

UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
“HNOS. SAÍZ MONTES DE OCA”

LA *TECNOLOGIA REDOX* EN LA EXPLORACION PETROLERA.
APLICACIONES EN CUENCA CENTRAL.

Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Geología
(Mención Geología Petrolera)

Autor: Ing. Osvaldo Rodríguez Morán

Tutor: Dr. Manuel Pardo Echarte

Ciudad de La Habana

2008

A mis padres, por el legado de amor y honestidad cotidiano.

A mis nietos, por ser la feliz prolongación de mis huesos.

A Ada Mina, por el AMOR urgente, siempre de reestreno.

A la Revolución, por la confianza.

AGRADECIMIENTOS

Quiero constatar el agradecimiento a los compañeros que han colaborado en la culminación de esta tesis que se presenta en opción al Título de Académico de Master en Geología, *Mención Geología Petrolera*.

Agradezco al Dr. Manuel Pardo Echarte, no solo por haberme regalado su ciencia, en estos años de trabajo incesante, sino más que todo, por su mano, siempre dispuesta, que trasciende a toda ley científica y a toda tutoría del saber de la tierra.

Al Ing. Pedro Humberto Pérez, por sus enseñanzas y su energía, a los Drs.: Juan Guillermo López y Gustavo Echevarría Rodríguez, por la confianza de siempre.

A los Drs.: Silvia Valladares, Rolando García, Héctor Zambrana, Olga Castro Castiñeiras y Norma Rodríguez por la ayuda constante.

A los Drs. René Fernández de Lara y Leodegario Lufriú por haber estado siempre dispuestos y en acción.

RESUMEN

*“La **Tecnología Redox** en la exploración petrolera. Aplicaciones en Cuenca Central”*, es el título de esta tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Geología (Mención Geología Petrolera). En la tesis se exponen dos aplicaciones del **Complejo Redox** en la Exploración Petrolera en las áreas de Ceballos y Cacahual en la región de Cuenca Central y además, se presenta el desarrollo y validación del Modelo Matemático, tanto para la determinación del Nivel de Fondo de los atributos (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedogeoquímica) como del proceso de interpretación de este complejo de métodos. El **Complejo Redox** es un complejo de técnicas no convencionales de exploración, usado para la detección directa y evaluación de diversos objetos de naturaleza metálica. El mismo brinda información sobre las modificaciones del medio que tienen lugar en la parte superior del corte, directamente sobre cualquier objetivo de naturaleza metálica, controladas, bajo el **Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos** hacia el suelo, por las particularidades de composición, grado (ley), rasgos geométricos y de yacencia del mismo. El complejo se aplica, con carácter complementario dentro de los complejos convencionales de exploración, en diferentes esferas: la exploración de hidrocarburos, que es el objetivo de esta tesis, de minerales metálicos; los estudios medio-ambientales de contaminación metálica y de hidrocarburos en suelos; y la búsqueda de enterramientos arqueológicos metálicos; logrando elevar la efectividad geológica y abaratando los costos.

SUMMARY

"*The **Redox Technology** in Oil Exploration. Applications in Cuenca Central*" is the title of this thesis presented in option to the Academic Category of Master in Geology (Mention Oil Geology). In the thesis two applications of **Redox Complex** are exposed in the Oil Exploration in Ceballos and Cacahual areas in the Cuenca Central region, and also, it shows up the development and validation of the Mathematical Modelation, as much for the determination of the Level of Fund of the attributes (Redox Potential, Magnetic Susceptibility, Spectral Reflectance and Pedogeochemistry) as of the process of interpretation of this complex of methods.

Redox Complex is an exploration non-conventional technical complex, used for the direct detection and evaluation of diverse objects of metallic nature. The same one offers information directly on the modifications of the means that take place in the superior part of the cut, on any metallic, controlled nature objective, under the Geochemistry Principle of the Vertical Migration of Metallic Ions toward the floor, for the composition particularities, grade (law), geometric features and of yacencia of the same one. The complex is applied, with complementary character inside the conventional complexes of exploration, in different spheres: the exploration of hydrocarbons that is the objective of this thesis, of metallic minerals; the half-environmental studies of metallic contamination and of hydrocarbons in floors; and the search of archaeological metallic burials; being able to elevate the geologic effectiveness and reducing the costs.

INDICE DE FIGURAS

✎Figura I.1. Posible modelo de alteraciones relacionadas con la microfiltración de hidrocarburo sobre un depósito de petróleo [Saunders, D. F. et al. (1999)].	8
✎Figura I.2. Modelo propuesto por Schumacher, D. (1999), en el artículo: Surface geochemical exploration for petroleum; in Exploring for traps and seals. AAPG Memoir.	13
✎Figura. II.1. Esquema representativo del Principio de la Migración Vertical de Iones Metálicos.	19
✎Figura II.2. Escenario AGE de la relación K/eTh con fines petrolíferos.	21
✎Figura II.3. Escenario Satelital con fines petrolíferos. Se muestra la Línea del Complejo Redox.	25
✎Figura II.4. Proceso de la medición in situ del Potencial Redox en suelos.	26
✎Figura II.5. Proceso de la medición in situ de la Susceptibilidad Magnética en suelos.	27
✎Figura II.6. Proceso de medición de la Reflectancia Espectral en muestras de suelos.	28
✎Figura II.7. Interfase de adquisición de datos del Sistema Redox.	29
✎Figura II.8. Áreas de Control donde fueron calibrados cada Play, Campo Mineral o Zona de Contaminación.	33
✎Figura III.1. Ejemplo de secuencia de observaciones de un atributo dado.	47
✎Figura III.2. Regresión resultante de los valores de la Tabla III.1.	49
✎Figura III.3. Regresión resultante de los valores de la Tabla III.2.	50

✎Figura III.4. Función para determinar el número de observaciones necesarias para el análisis del Nivel de Fondo.	51
✎Figura III.5. Regresión para generalizar el valor del coeficiente para cualquier Valor Medio de las observaciones.	52
✎Figura III.6. Esquema donde se muestran las posibles ubicaciones de los tres tipos de Puntos Singulares.	55
✎Figura III.7. Línea esquemática donde se muestran los Puntos Singulares incompletos en los extremos.	56
✎Figura III.8. Ejemplo de dependencia entre Kappa Normalizada y Contenido de Níquel Normalizado.	59
✎Figura III.9. Esquema del principio de agrupación angular para la determinación de las direcciones fundamentales de las dependencias entre atributos.	60
✎Figura III.10. Ejemplo de la dependencia de Kappa Normalizada y Contenido de Níquel Normalizado para el objetivo de Jatibonico Nuevo.	61
✎Figura III.11. Esquema que ilustra el algoritmo de aproximaciones sucesivas.	62
✎Figura III.12. Dendrograma de la Tabla de Objeto-Propiedades asociada a partir de los atributos.	64
✎Figura III.13. Dendrograma de la Tabla de Objeto-Propiedades asociada a partir de los atributos.	66
✎Figura III.14. Esquema del principio de depuración de las profundidades dentro de un Intervalo de Respuesta Anómala.	69
✎Figura III.15. Esquema del proceso de geometrización dentro del Intervalo de Respuesta Anómala.	70
✎Figura III.16. Distribución de la secuencia de coordenadas de la poligonal.	71
✎Figura III.17. Señalización de uno de los sectores al cual se le calcula el área.	72
✎Figura III.18. Hoja Excel para el almacenamiento de los datos (BaseDatos).	75

✎ Figura III.19. Hoja Excel para la selección de los datos (SeleDatos).	77
✎ Figura III.20. Hoja Excel para la estimación de los IRAA, IRA y los PS de la Línea (PS_IRAA_IRA_PARA).	78
✎ Figura III.21. Hoja Excel para la selección de los pares de las dependencias (DatosDependAtrib).	80
✎ Figura III.22. Hoja Excel para la resolución de las dependencias (Dependencias).	81
✎ Figura III.23. Hoja Excel para el cálculo y depuración de las profundidades (Profundidades).	82
✎ Figura III.24. Hoja Excel para la clasificación del objetivo a partir de los patrones (Clasificación).	83
✎ Figura III.25. Hoja Excel para la graficación del modelo propuesto (Geometrización).	85
✎ Figura III.26. Hoja Excel para la estimación del volumen del Prospecto (CálculoVolumétrico).	86
✎ Figura III.27. Hoja Excel auxiliar para variables globales de trabajo (Definiciones).	87
✎ Figura IV.1. Ubicación geográfica del Sector Ceballos.	90
✎ Figura IV.2. Escenario Estructural de la Sísmica de Reflexión 2D del sector de los trabajos.	92
✎ Figura IV.3. Escenario Satelital del sector Ceballos.	93
✎ Figura IV.4. Escenario AGE del sector Ceballos.	94
✎ Figura IV.5. Interpretación geomorfológica del sector Ceballos.	95
✎ Figura IV.6. Posición cartográfica relativa de los dos objetivos de este capítulo, de izquierda a derecha: Sector Cacahual y Sector Ceballos.	96
✎ Figura IV.7. Mapa de la Susceptibilidad Magnética Normalizada (Kn) del sector Ceballos.	98
✎ Figura IV.8. Mapa del Potencial Redox Reducido (Ur) del sector Ceballos.	99
✎ Figura IV.9. Interpretación cuantitativa de los datos del Complejo Redox en el Perfil Central 2T del sector Ceballos.	100

✎Figura IV.10. Mapa Gravimétrico Residual con Radio de Promediación de 2 km del sector Ceballos.	101
✎Figura IV.11. Mapa Aeromagnético Reducido al Polo del sector Ceballos.	102
✎Figura IV.12. Comparación de los resultados del Complejo Redox con el levantamiento estructural de la Sísmica de Reflexión 2D.	102
✎Figura IV.13. Ubicación geográfica de los Sector Cacahual.	103
✎Figura II.14. Imagen Satelital del sector Cacahual.	105
✎Figura IV.15. Mapa Aerogammaespectrométrico (K/eTh) del sector Cacahual.	105
✎Figura IV.16. Mapa Aeromagnético Reducido al Polo del sector Cacahual.	106
✎Figura IV.17. Mapa Gravimétrico Residual (R=2km) y el resultado de la interpretación sísmica del sector Cacahual.	107
✎Figura IV.18. Mapa Topográfico y contornos de los máximos morfométricos del sector Cacahual.	108
✎Figura IV.19. Posición cartográfica relativa de los dos objetivos de este capítulo, de izquierda a derecha: Sector Cacahual y Sector Ceballos.	109
✎Figura IV.20. Sísmica existente y sistema de perfiles del Complejo Redox en el sector Cacahual.	111
✎Figura IV.21. Interpretación de los datos del Complejo Redox en el Perfil T del sector Cacahual.	112
✎Figura IV.22. Datos combinados del sector Cacahual y ubicación del pozo Villa en el sector Cacahual.	113

INDICE DE TABLAS

✎Tabla III.1. Coeficiente que debe aplicarse para determinar si un elemento es considerado ráfaga.	49
✎Tabla III.2. Relación entre el número total de elementos del Perfil (Línea) y el número de observaciones necesaria para el análisis del Nivel de Fondo.	50
✎Tabla III.3. Tabla que establece la relación de Experto entre el Valor Medio de las observaciones y el coeficiente a partir del cual se evaluará la permanencia o no de cada uno de los elementos dentro del grupo seleccionado.	51
✎Tabla III.4. Relación de los Niveles de Fondo establecidos por el Algoritmo y por el Experto para cada uno de los perfiles tomados como muestra, además del Valor absoluto de las diferencias.	54
✎Tabla III.5. Tabla de Objetos/Propiedades (TOP).	64
✎Tabla III.6. Tabla de Objetos/Propiedades Tipificada (TOP*).	65
✎Tabla III.7. Autovalores de la TOP* de los Patrones.	65
✎Tabla III.8. Carga de los dos factores para cada uno de los atributos. Sombreado para valores mayores de 0.77 .	66
✎Tabla IV.1 Valores correspondiente al Perfil 2T, respecto a los atributos observados y su correspondiente valor de fondo en cada estación.	97
✎Tabla IV.2 Valores correspondiente al Perfil 2T, respecto al contenido de los elementos químicos de las muestras tomadas y el valor de fondo para cada estación.	97
✎Tabla IV.3 Valores correspondiente al Perfil LF, respecto a los atributos observados y su correspondiente valor de fondo en cada estación.	110

✎ Tabla IV.4 Valores correspondiente al Perfil LF, respecto al contenido de los elementos químicos de las muestras tomadas y el valor de fondo para cada estación.

GLOSARIO

a_i, b_i	Valores calculados a partir del punto medio perteneciente al lugar geométrico de la recta (dependencia entre atributos) entre el valor extremo de ella y el Punto Pivote.
CENDA	Centro Nacional de Derecho de Autor
C_n	Contenido de Elemento Químico Normalizado
CHIM	Extracción Parcial de Metales (en Ruso)
ICGC	Instituto de Cubano de Geografía y Cartografía
ICP	Plasma Acoplado Inductivamente
IRA	Intervalo de Respuesta Anómala.
IRAA	Intervalo de Respuesta Anómala por Atributo.
K/eTh	Relación Potasio/Thorio Equivalente
K_n	Susceptibilidad Magnética Normalizada
MMI	Iones Metálicos Móviles
PARA	Punto de Ausencia de Respuesta Anómala.
PS	Punto Singular.
ppm	Parte Por Millón
RE_r	Reflectancia Espectral Reducida
U_r	Potencial Redox Reducido

INDICE

	pág.
INTRODUCCION	1
El Problema Científico.	1
Objeto de la Investigación.	2
Hipótesis.	2
Objetivos.	2
Tareas.	3
I. EL ESTADO DEL ARTE DEL <i>COMPLEJO REDOX</i> Y DE OTROS METODOS GEÓLOGO- GEOFÍSICO-GEOQUÍMICOS NO CONVENCIONALES DE PROSPECCIÓN.	5
II. LA TECNOLOGÍA REDOX. CONSIDERACIONES METODOLOGICAS Y EMPIRICO-TEORICAS.	16
II.1. La Tecnología Redox.	16
II.2. Posibilidades de la Tecnología Redox en las diferentes esferas de aplicación.	17
II.3. El Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos.	19
II.4. Escenarios a distancia no convencionales: Aerogeofísicos y Satelitales.	21
II.5. Sobre la Metodología de los trabajos del Complejo Redox.	26
II.6. Sobre la Interpretación de los datos del Complejo Redox.	29
II.7. Sustentación empírica del Complejo Redox.	32
II.8. Relaciones Funcionales Empíricas de los atributos del Complejo Redox: La Medición In Situ del Potencial Redox en suelos y la Interpretación Cuantitativa de los Parámetros Inherentes a la fuente metálica.	33
II.8.1. Potencial Redox Reducido. Expresiones Matemáticas.	33

II.8.2. Contenido de Elementos Químicos. Expresiones Matemáticas.	35
II.8.3. Relaciones entre Atributos Reducidos o Normalizados. Expresiones Matemáticas.	36
II.9. Interpretación Cuantitativa	38
II.10. Proceso de Interpretación.	39
III. MODELO MATEMATICO DEL <i>COMPLEJO REDOX</i>.	42
III.1. Introducción.	42
III.2. El Proceso de Modelación Matemática del Complejo Redox.	45
III.2.1. Determinación del Nivel de Fondo de los atributos.	46
III.2.2. Proceso de Interpretación de los atributos	54
III.2.2.1. Determinación de los Puntos Singulares (PS).	55
III.2.2.2. Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala por Atributos (IRAA).	56
III.2.2.3. Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala del Perfil (IRA) y de los Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA).	57
III.2.2.4. Determinación de las dependencias entre los atributos.	58
III.2.2.5. Estimación de las profundidades bajo los Puntos Singulares.	61
III.2.2.6. Depuración de las profundidades.	62
III.2.2.7. Clasificación del Intervalo de Respuesta Anómala del Perfil.	63
III.2.2.8. Geometrización de los resultados.	68
III.2.2.9. Estimación Volumétrica del Modelo.	70
III.2.3. Validación del Modelaje.	72
IV. LA TECNOLOGIA REDOX APLICADA A LA EXPLORACION PETROLERA EN CUENCA CENTRAL	89
IV.1. Introducción.	89
IV.2. Sector Ceballos.	90
IV.3. Sector Cacahual.	102

CONCLUSIONES	115
RECOMENDACIONES	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

INTRODUCCION

INTRODUCCION

Uno de los objetivos del Programa Petrolero Cubano aprobado en el año 2005 es el de incrementar la efectividad del proceso exploratorio utilizando tanto métodos convencionales como no convencionales, por lo que el tema de esta tesis se inscribe dentro de los programas del país. El desarrollo de una tecnología propia de exploración para petróleo y minerales utilizando el **Complejo Redox** (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedogeoquímica) ha sido objeto de investigaciones por parte de instituciones nacionales por lo que se considera que existe una coincidencia de los planes y programas estatales y el tema de la tesis.

El tratar de reconocer la presencia de hidrocarburos por métodos no convencionales (directos e indirectos), ha sido una constante en el quehacer de la exploración de este importante recurso desde hace varias décadas en el mundo, con el propósito de tratar de aumentar el coeficiente de acierto en los hallazgos, a bajos costos, minimizando el riesgo durante la exploración. Ello revela la actualidad del tema de la tesis.

El Problema Científico.

En el área de Cuenca Central, en los últimos 55 años solo se han revelado como yacimientos petroleros, el área Cristales (mediano), Jatibonico (pequeño) y Pina (pequeño), además de otras áreas con muy limitadas producciones como son Reforma, Catalina, Guayacanes, Mamonal y Brujo. En los últimos tiempos, ha aumentado la tasa de desaciertos en la perforación de la exploración petrolera, apoyados esencialmente por métodos convencionales de exploración petrolera.

¿Cómo aplicar el **Complejo Redox**, el cual es un método geoquímico-geofísico no-convencional, como vía alternativa para la disminución de los riesgos en la exploración petrolera en el área de Cuenca Central?

Objeto de la Investigación.

El área de la Cuenca Central.

Hipótesis.

Si en un área determinada se correlacionan en buena medida un subconjunto de las siguientes anomalías:

- ✍ Anomalías Satelitales.
- ✍ Anomalías Aerogammaespectronétrica (K/eTh).
- ✍ Anomalías Geomorfológicas de detalle y de Campos Potenciales.
- ✍ Resultado anómalo en el perfil de Reconocimiento del **Complejo Redox**.
- ✍ Delimitación espacial de la anomalía en la Cartografía Detallada el **Complejo Redox**.

Entonces, se podrá suponer la presencia de un prospecto gasopetrolífero en profundidad, sin aludir a su significación económica.

Objetivos.

A partir de lo antes expuesto, se plantea el siguiente Objetivo General:

- ✍ Identificar objetivos gasopetrolíferos en el área de Cuenca Central modelando y aplicando la **Tecnología Redox**.

Objetivos Particulares:

1. Modelar matemáticamente el proceso de interpretación del **Complejo Redox** para facilitar y generalizar su aplicación.
2. Validar el Modelo Matemático del proceso de interpretación del **Complejo Redox**.

- 3.Reducir la región a las áreas de interés, a partir del procesamiento de imágenes satelitales y mapas aerogammaespectrométricos de la Relación K/eTh.
- 4.Procesar e interpretar la geomorfología y los campos potenciales del sector.
- 5.Hacer un perfil de reconocimiento del **Complejo Redox** sobre las anomalías encontradas.
- 6.Desarrollar la Cartografía Detallada del **Complejo Redox** de los prospectos que resulten favorables.
- 7.Brindar información sobre las particularidades de composición, rasgos geométricos y de yacencia de las ocurrencias a partir de las características geofísico-geoquímicas del corte interpretado por el **Complejo Redox**.

Tareas.

Por la complejidad del primer objetivo, sobre de la Modelación Matemática del proceso de Interpretación del **Complejo Redox**, es que lo desagregamos en las siguientes tareas:

- ✍ Determinar del Nivel de Fondo de los atributos del **Complejo Redox**.
- ✍ Establecer los Intervalos de Respuesta Anómala por Atributos (**IRAA**).
- ✍ Establecer los Intervalos de Respuesta Anómala del Perfil (**IRA**) y los Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (**PARA**).
- ✍ Establecer los Puntos Singulares (**PS**).
- ✍ Modelar la determinación de las dependencias entre los atributos.
- ✍ Calcular las profundidades bajo los Puntos Singulares.
- ✍ Depurar las profundidades a partir de los atributos para una estación.
- ✍ Conformar los cuatro Patrones: Yacimiento Cristales, Yacimiento Jatibonico, el sector Jatibonico Oeste y el sector Jatibonico Nuevo.
- ✍ Definir la Medida de Similitud para la clasificación de nuevos objetivos interpretados.
- ✍ Modelar la geometrización del prospecto.
- ✍ Estimar a “**groso modo**” el volumen de la geometrización del modelo.

I. EL ESTADO DEL ARTE DEL **COMPLEJO REDOX** Y DE OTROS METODOS
GEÓLOGO- GEOFÍSICO-GEOQUÍMICOS NO CONVENCIONALES DE
PROSPECCIÓN.

I. EL ESTADO DEL ARTE DEL **COMPLEJO REDOX** Y DE OTROS METODOS GEÓLOGO- GEOFÍSICO-GEOQUÍMICOS NO CONVENCIONALES DE PROSPECCIÓN.

El tratar de reconocer la presencia de hidrocarburos por métodos no convencionales, ha sido una constante en el quehacer de la exploración de este importante recurso en Cuba desde hace varias décadas, y así, de esta manera, tratar de aumentar sensiblemente el coeficiente de acierto en los hallazgos, minimizar el riesgo y disminuir los costos en la etapa de exploración.

En el período comprendido entre los años 1991-1993 se dieron los primeros pasos en la conformación de lo que es en la actualidad el **Complejo Redox** con la invención, el diseño y la introducción de la Medición In Situ del Potencial Redox en suelos. También en este periodo se introducen los Escenarios Aerogammaespectrométricos de la relación K/eTh. Estas aplicaciones primarias se llevaron a cabo en áreas petrolíferas como: Cantel, Motembo, Costa Norte Habana - Matanzas (El Fraile-La India), elaborando en el año 1993 uno de los primeros documentos sobre los trabajos metodológicos –experimentales de métodos geofísicos y geoquímicos no convencionales para la prospección de hidrocarburos someros en Cuba Septentrional [Alfonso, J., et al. (1993)].

A partir de ese momento, le prosiguió una serie de aplicaciones del Potencial Redox y la Susceptibilidad Magnética en la esfera de la búsqueda de minerales metálicos, siendo un ejemplo de reporte de estos trabajos, en 1994 [Pardo, M., et al. (1994)], el Informe del Tema (I+D): Fundamentación del pronóstico y de las direcciones de búsqueda para minerales sólidos en la Cúpula de Trinidad, macizo metamórfico de Escambray, del Instituto de Geología y Paleontología.

Posteriormente, en una segunda etapa entre los años 1996 y el 2001, se logra establecer, definitivamente, la relación genética entre el Potencial Redox y la Susceptibilidad Magnética del suelo y se introduce en la prospección el Complejo

Uredox-Kappa. También se logra la invención, el diseño y la introducción de la Medición Temporal del Potencial Redox, a partir de la formulación matemática de su Comportamiento Transitorio, además, se establece la relación genética entre el Potencial Redox y la Pedogeoquímica, a partir del **Principio de la Migración Vertical de los Iones Metálicos**. Es en esta etapa que aparece entonces la introducción incipiente del nuevo Complejo Uredox – Kappa - Pedogeoquímica cuya aplicación estuvo limitada por severas restricciones financieras. En esta etapa, se resumen los progresos de las técnicas no convencionales para la prospección petrolífera en el trabajo [Pardo, M., et al. (2001)] titulado: Técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales para la prospección de hidrocarburos; progresos de su aplicación en Cuba, presentado en el Congreso Cubano de Geología de ese año.

Posteriormente en 1999, se continuó desarrollando el método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la kappametría a los fines de la prospección geológica [Pardo, M.; Stout, R. (1999)]. En esta etapa, el Complejo Uredox–Kappa es aplicado en zonas petrolíferas como: Canasí, Juan Gualberto Gómez, Madruga, San Miguel de Bagá, Varadero, Varadero Sur, Cantel, Pina, Brujo Norte, Paraíso y Los Naranjos. Otros informes [Pardo, M.; Stout, R., et al. (2000)] se sucedieron en el 2000, el cual fue un año de amplia aplicación de este complejo de técnicas sobre objetivos de prospección de minerales metálicos e hidrocarburos, teniendo como ejemplo, para minerales, una aplicación del complejo Uredox–Kappa- Pedogeoquímica en los yacimientos Mella y el Stockwork La Unión [Pardo, M.; Stout, R.; Aragón, R., et al. (2000)]. En ese mismo año 2000 se obtuvo el Certificado de Invención No. 22635, OCPI titulado: Método de medición del Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la kappametría a los fines de la prospección geológica [Pardo, M. (2000)].

En el último período de desarrollo del **Complejo Redox**, es decir del año 2001 al 2004, se establece la relación genética entre la Reflectancia Espectral y la Pedogeoquímica, a partir del **Principio de la Migración Vertical de los Iones Metálicos**, además se logra la innovación, el diseño y la introducción de la Reflectancia Espectral Reducida en muestras de suelo e Imágenes Satelitales,

también se logra la innovación, diseño e introducción de los Escenarios Petrolíferos y Metalíferos Satelitales. Consecuentemente, se pasa a la integración definitiva del **Complejo Redox** (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedogeoquímica).

Ya, en este momento del desarrollo del **Complejo Redox**, había una necesidad imperante de automatizar el proceso de adquisición, almacenamiento, elaboración e interpretación de los datos, por lo que no bastaba diseñar una Base de Datos que resolviera las necesidades clásicas consecuente con la naturaleza de este complejo de métodos geofísico-geoquímicos, sino el de ir más allá en el procesamiento automático de la elaboración primaria de los atributos, y en el proceso de interpretación. Es por ello que como colofón a esta etapa, se logra la invención de las expresiones matemáticas obtenidas empíricamente y que vinculan a los distintos atributos con los parámetros de yacencia, geométricos y de composición de los objetos de prospección, y la innovación, el desarrollo y la implementación, mediante el **Sistema Redox**, de los procesos de determinación del nivel de fondo de los atributos en la etapa de la elaboración primaria, y de interpretación a partir de la modelación matemática de la experiencia del Experto. En este período fue aplicado, parcialmente, el mencionado desarrollo del **Complejo Redox** a las áreas petrolíferas de Cuenca Central, Cuenca Redención y el área de Maniabón en Puerto Padre, correspondientes a cuatro campañas de campo: Majagua 1, Majagua 2, Majagua 3 y Majagua 4.

Desde el punto de vista internacional, este tema de la aplicación de las técnicas no convencionales para la exploración petrolera a partir de métodos geólogo-geofísico-geoquímicos viene siendo tratado desde hace varias décadas, fundamentalmente, por un conjunto de especialistas como son: D. F. Saunders, J. F. Branch, C. K. Thompson, K. R. Burson y D. Schumacher .

Las aplicaciones utilizadas por estos autores se fundamentan en el principio de la microfiltración de hidrocarburos ligeros (gases), el cual difiere en fundamento al principio en el cual se estructura el **Complejo Redox** que es el de la **Migración Vertical de Iones Metálicos**.

Uno de los trabajos más importantes de los mencionados autores fue el publicado en la AAPG Bulletin por D. F. Saunders, K. R. Burson y C. K. Thompson en 1999 titulado: Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations [Saunders, D. F., Burson, K. R., Thompson, C.K. (1999)]. Por ser este trabajo uno de los más recientes e importantes en esta esfera del conocimiento, expondremos a continuación sus conceptos fundamentales:

El complejo de métodos considerado, es:

- (1) levantamiento aéreo con sensores de microondas y análisis de laboratorio de muestras de hidrocarburos gaseosos en suelos,
- (2) Aeromagnetometría de fuentes poco profundas y mediciones de la Susceptibilidad Magnética de muestras de suelo,
- (3) Mediciones de rayos gamma superficiales y aéreas y
- (4) Geomorfología para encontrar los depósitos de petróleo y gas productivos.

Saunders y su equipo exponen que con estos métodos se puede incrementar sustancialmente la probabilidad de éxito de las perforaciones y reducir los costos en las áreas geológicamente seleccionadas [Saunders, D. F., Burson, K. R.; Branco, J. F., Thompson, C. K. (1989)].

Más adelante se describe que el dióxido de carbono producido por la degradación bacteriana anaeróbica (o debido a la oxidación) de hidrocarburos por bacterias aeróbicas, forma ácido carbónico (H_2CO_3), en el agua del subsuelo, como se muestra en la Fig. I.1, que representa el modelo propuesto por los autores.

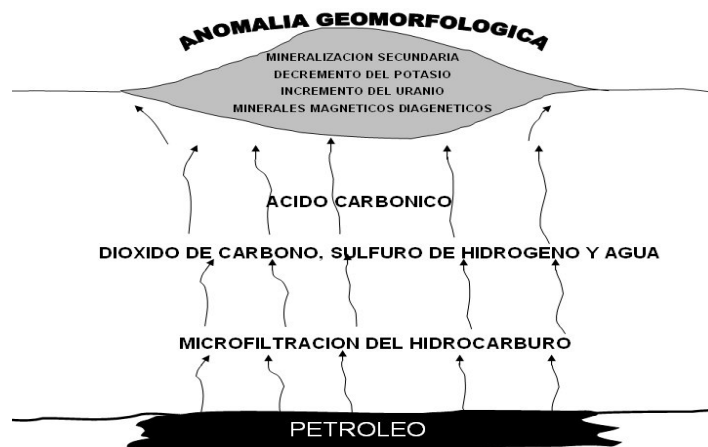


Figura I.1. Posible modelo de alteraciones relacionadas con la microfiltración de hidrocarburo sobre un depósito de petróleo [Saunders, D. F. et al. (1999)].

El ácido carbónico podría reaccionar con el silicato de Calcio y resultaría en una mineralización carbonatada diagenética o una silicificación, es decir:



Esta reacción resulta en que se deposite cemento de calcita y se genere sulfuro de hidrógeno, el cual puede reaccionar con óxido de hierro como se muestra en la Fig. I.1.

Se ha observado que los pozos son –relativamente- más fáciles de perforar si estos resultan secos con relación a cuando resultan productivos, cuyas perforaciones son en general más dificultosas por la dureza de la roca. Esta dificultad en la perforación ha sido atribuida a la mineralización secundaria causada por la migración vertical del hidrocarburo. Los estratos más duros causan por lo tanto, también, altas velocidades de las ondas sísmicas por ellos. De igual manera, este endurecimiento hace que la erosión desgaste el terreno más lentamente y así sea este también responsable de una elevación topográfica relativa en los campos de petróleo.

Con respecto a la Susceptibilidad Magnética, han sido reportadas anomalías aeromagnéticas originadas por fuentes superficiales en yacimientos de petróleo y gas. Estas anomalías de altas frecuencias fueron atribuidas a minerales magnéticos diagenéticos. La actividad humana, con relación al uso del hierro y/o el acero, y otros factores naturales provoca falsas anomalías o interferencias y con frecuencia impiden la detección aérea de las pequeñas anomalías causadas por los minerales magnéticos diagenéticos.

Se han encontrado suelos con susceptibilidades magnéticas altamente anómalas en gravas sobre yacimientos y prospectos no perforados. Estas mediciones no se ven alteradas por objetos de hierro o acero cercano y pueden ser usadas efectivamente en el estudio de la distribución de minerales magnéticos diagenéticos [Saunders, D. F., Burson, K. R., Branco, J. F., Thompson, C. K. (1993); Saunders, D. F., Branco, J. F., Thompson, C. K. (1994)].

Varios investigadores han reportado todas las formas magnéticas de los óxidos de hierro y de sulfuros entre los minerales diagenéticos sobre yacimientos de petróleo, incluyendo la maghemita, la magnetita, la pirrotita y la greigita

diagenéticos [Saunders, D. F., Burson, K. R., Branco, J. F., Thompson, C. K. (1993); Saunders, D. F., Branco, J. F., Thompson, C. K. (1994)].

Los sulfuros de hidrógeno relacionados con la acción microbiana en el proceso de microfiltración pueden reaccionar con óxido de hierro no magnético (goethita) para producir magnetita. Un tiempo después, si la magnetita es expuesta a las condiciones de oxidación, esta puede ser convertida en maghemita, hematita magnética o hematita gamma, la cual retiene la estructura de cristal de la magnetita y sus propiedades magnéticas, con la fórmula química Fe_2O_3 diagenéticos [Saunders, D. F., Burson, K. R., Branco, J. F., Thompson, C. K. (1993); Saunders, D. F., Branco, J. F., Thompson, C. K. (1994)].

El ambiente químicamente reductor producido microbianamente (presencia del sulfuro de hidrógeno), puede dar como resultado el aumento de las concentraciones de Uranio con el tiempo. El uranio tiene dos estados de valencia. En el estado de oxidación, el uranio como el ión uranio (UO_2^{++}), es soluble en aguas subterráneas. Cuando este es reducido, él se convierte en UO_2 , uraninita, el cual es relativamente insoluble. Así el uranio tenderá a migrar en las aguas subterráneas a partir de un ambiente de oxidación a un ambiente de reducción. La asociación de depósitos sedimentarios de uranio con yacimientos de petróleo ha sido descrita por diferentes autores diagenéticos [Saunders, D. F., Burson, K. R., Branco, J. F., Thompson, C. K. (1993); Saunders, D. F., Branco, J. F., Thompson, C. K. (1994)].

Como ha sido indicado, los ácidos relacionados con la acción microbiana en el proceso de microfiltración pueden lixiviar el potasio y el uranio de los suelos. La chimenea de reducción química sobre los depósitos de petróleo puede subsecuentemente producir concentraciones de uranio en esa región, pero no afectará similarmente al potasio. Así, concentraciones bajas de potasio conviven con altas concentraciones de uranio que son entonces indicadores favorables de petróleo en profundidad.

En este trabajo diagenéticos [Saunders, D. F., Burson, K. R., Thompson, C. K. (1999)], se concluye lo siguiente:

- ✍ No hay una firme evidencia de que uno pueda clasificar un prospecto como económico o no económico basado en los métodos relacionados con la microfiltración. Existen muchas variables desconocidas controlando el proceso de microfiltración y el crecimiento asociado a la colonia de bacterias.
- ✍ Ningún método basado solo en la microfiltración de hidrocarburos puede determinar la profundidad de los reservorios. Detectando directamente la microfiltración de hidrocarburos y sus alteraciones puede incrementarse la capacidad para focalizar cuidadosamente los esfuerzos de la exploración sísmica, siendo la oportunidad de éxito mayor para cada acumulación estratigráfica o estructural.
- ✍ La experiencia en la exploración con la combinación de varios métodos ha demostrado el incremento de la efectividad sobre el uso de métodos aislados en la exploración petrolera. Toda la evidencia disponible indica que la presencia simultáneamente de anomalías relacionadas con la microfiltración y una fuerte combinación de anomalías convencionales, pueden mejorar significativamente las oportunidades estadísticas de encontrar hidrocarburos y esta oportunidad mejora con el aumento del número de métodos independientes que apoyen el prospecto.
- ✍ Finalmente, ningún método es perfecto. Los métodos relacionados con la microfiltración de hidrocarburos no son diferentes: pudiera resultar anomalías no relacionadas con petróleo económico en profundidad; algunos depósitos de petróleo pueden no ser detectables en anomalías superficiales por un solo método, debido a una variedad de razones que incluyen la metodología y las técnicas de muestreo, condiciones meteorológicas y de suelo y/o la actividad biológica.

Un trabajo algo posterior sobre la exploración de geoquímica superficial para petróleo realizado por Schumacher [Schumacher, D. (1999)], expresa que la exploración geoquímica para petróleo se basa en buscar ocurrencias de hidrocarburos y el producto de sus alteraciones. Esto sirve de fundamento para la localización de acumulaciones de petróleo y gas no descubiertos. Todos los

métodos geoquímicos de superficie asumen que el hidrocarburo generado y entrampado en la profundidad, se filtra invariablemente y es detectable cuantitativamente en la superficie [Schumacher, D. (1999)].

Las técnicas de exploración geoquímica pueden ser directas o indirectas. Las técnicas directas analizan las pequeñas cantidades de hidrocarburos que ocurren en el espacio poral de los suelos, o que son incorporados en el cemento del suelo. Los métodos geoquímicos indirectos detectan los cambios inducidos por el filtrado de los hidrocarburos en el suelo, sedimentos o vegetación. Los datos de la exploración geoquímica han encontrado gran utilidad cuando se han integrado con los datos geológicos y geofísicos [Schumacher, D. (1999)].

A partir del modelo propuesto (Fig. I.2) de las evidencias geoquímicas de la filtración [Schumacher, D. (1999)], la expresión geoquímica de superficie puede tomar muchas formas:

- ✍ Concentraciones anómalas de hidrocarburos en sedimentos, suelos, agua y en toda la atmósfera.
- ✍ Anomalías microbiológicas y de formación de parafina sucia.
- ✍ Gases anómalos no de hidrocarburos tales como helio y radón.
- ✍ Cambios mineralógicos tales como la formación de calcita, pirita, uranio, sulfuros elementales y ciertos óxidos y sulfuros de hierro magnético.
- ✍ Alteración mineral de arcilla.
- ✍ Anomalías de radiaciones.
- ✍ Anomalías geotermales e hidrogeológicas.
- ✍ Blanqueamiento de lechos rojos.
- ✍ Anomalías geobotánicas.
- ✍ Propiedades magnéticas, eléctricas y acústicas de suelos y sedimentos alterados.

La **Tecnología Redox**, a diferencia de las técnicas antes expuestas, aplica el Potencial Redox y la Reflectancia Espectral, e igual que las anteriores, incluye las mediciones de la Susceptibilidad Magnética in-situ y la información geomorfológica. Por constituir un complejo de métodos de **detección directa** (de naturaleza geoquí-

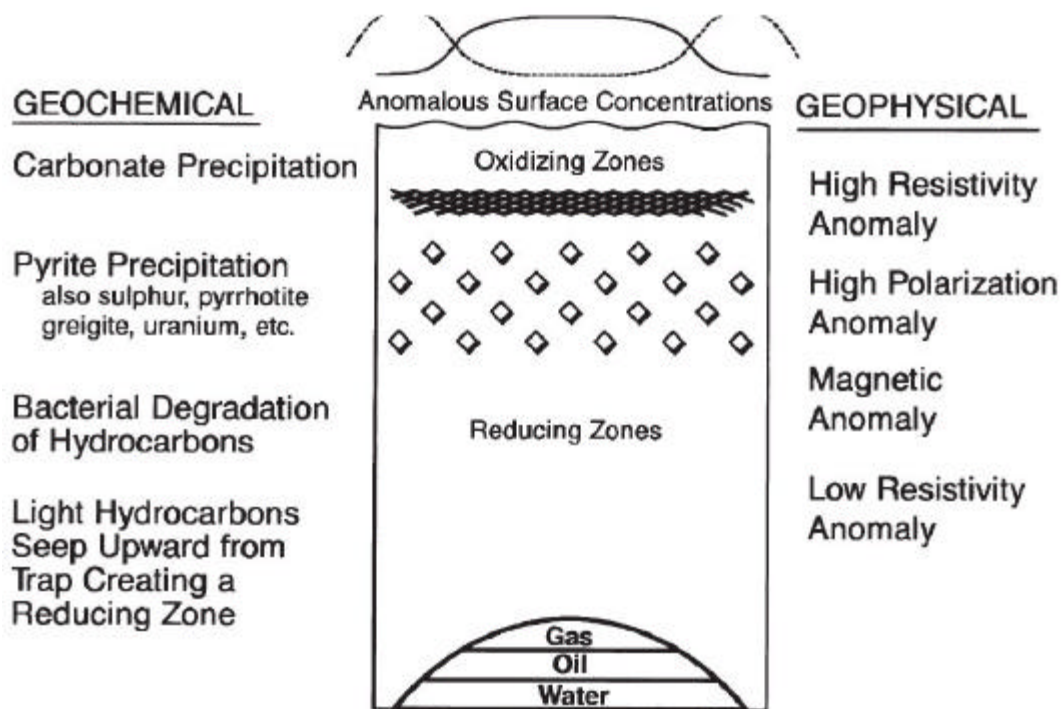


Figura I.2. Modelo propuesto por Schumacher, D. (1999), en el artículo: Surface geochemical exploration for petroleum; in Exploring for traps and seals. AAPG Memoir.

mica inorgánica) basado en el **Principio de la Migración Vertical de los Iones Metálicos** provenientes del hidrocarburo entrampado, le es dada la posibilidad de hacer estimaciones cuantitativas sobre la profundidad y calidad del mismo, a diferencia de las técnicas no convencionales clásicas explicadas anteriormente, las cuales, por ser de naturaleza indirecta, le es privativo esta posibilidad. No obstante, para la **Tecnología Redox**, también, resultan válidas las conclusiones de Saunders y otros [Schumacher, D. (1999)] relativas a:

- ✍ No existe una firme evidencia de que uno pueda clasificar un prospecto como económico o no económico basado en esta tecnología.
- ✍ Detectando directamente las alteraciones provocadas por el hidrocarburo puede incrementarse la capacidad para focalizar cuidadosamente los esfuerzos de la exploración sísmica, siendo la oportunidad de éxito mayor para cada acumulación estratigráfica o estructural.

- ✍ La experiencia en la exploración con la combinación de varios métodos ha demostrado el incremento de la efectividad sobre el uso de métodos aislados.
- ✍ Ningún método es perfecto. La **Tecnología Redox** no es diferente: pudiera resultar en anomalías no relacionadas con petróleo económico en la profundidad, o en establecer una profundidad falsa vinculada con una manifestación sin interés económico cuando el reservorio real está a otra profundidad.

II. LA ***TECNOLOGIA REDOX***. CONSIDERACIONES METODOLOGICAS Y
EMPÍRICO–TEÓRICAS.

II. LA **TECNOLOGÍA REDOX**. CONSIDERACIONES METODOLOGICAS Y EMPIRICO-TEORICAS.

II.1. La **Tecnología Redox**.

Apremiados por la progresiva reducción del financiamiento a la prospección geológica, se ha hecho cada vez más imperativa la necesidad de elevar la efectividad geólogo-económica de los programas mínimos por métodos convencionales. Una vía para lograrlo es su complementación con técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales como el **Complejo Redox**, el cual brinda información sobre las modificaciones del medio que tienen lugar en la parte superior del corte, directamente sobre el objetivo, controladas por las particularidades de composición, grado, rasgos geométricos y de yacencia del mismo, por lo que resulta particularmente efectivo en su localización y caracterización, permitiendo la optimización de la toma de decisiones y la elevación de la tasa de éxito de la perforación exploratoria.

El **Complejo Redox** (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedogeoquímica) es un complejo de técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales de exploración, usado para la detección directa y evaluación de diversos objetos de naturaleza metálica, el cual se basa en el **Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos** hacia el suelo. Este complejo se integra en una nueva tecnología (**Tecnología Redox**) a partir del uso de una Estrategia de Exploración basada en el empleo de Escenarios Satelitales para la reducción de áreas y la selección de los sectores más favorables para la verificación terrestre (reconocimiento y evaluación), cuyo diseño se basa en el mismo principio geoquímico antes mencionado. El **Complejo Redox** se aplica con éxito en diferentes esferas: la exploración de hidrocarburos y minerales metálicos; los estudios de contaminación metálica y de hidrocarburos en suelos; y la búsqueda de enterramientos arqueológicos metálicos; resultando en un

incremento de la efectividad de las investigaciones convencionales donde es utilizado con carácter complementario dentro de los respectivos complejos.

El **Complejo Redox** ha sido empleado, en Cuba [Pardo, M. (1991); Pardo, M., Millán, G., Álvarez, H. et al. (1994); Pardo, M., Álvarez, J., Echevarria, G. (1997); Pardo, M., Stout, R. (1999); Pardo, M. (2000); Pardo, M., Stout, R., Aragón, R., Álvarez, E. Lugo, R. (2000); Pardo, M., Stout, R. et al. (2000); Pardo, M., Stout, R. (2001); Pardo, M. (2001); Pardo, M., Stout, R., Kessell, E., Mugía, H., Morales, M. A., Rojas, F. (2001); Pardo, M. (2003); Pardo, M., Stout, R., et al. (2003)] en diferentes tipos de depósitos de petróleo (Cantel, Pina, Varadero-Varadero Sur, Jatibonico y Cristales) y de minerales metálicos (Mella, La Unión, Antonio, Little Golden Hill, Florencia- Cuerpos Norte y Sur, Jacinto- Vetas Beatriz y El Limón, Camagüey II, Cuba Libre- Río Negro, Yagrumaje Norte, Camarioca Este, Unión 1, Descanso, Meloneras, Stock Güaímaro y Sigua), los cuales son representantes de una amplia variedad de ambientes geológicos, tipos genéticos, componentes útiles, rasgos estructuro- texturales del reservorio o de la mena, condiciones geométricas y de yacencia, así como de relieve. Las aplicaciones para medio-ambiente y arqueología consideran, respectivamente, las zonas perimetrales de las industrias: Fábrica de Baterías Secas Pilas Yara, Siderúrgica Antillana de Acero, Refinería Níco López, Electroquímica de Sagua, Fabrica de Sulfometales y Fabrica de Pinturas Capdevilla; y los sitios arqueológicos Jardín Exterior del Castillo de la Fuerza y Caimito.

II.2. Posibilidades de la *Tecnología Redox* en las diferentes esferas de aplicación.

Aunque las aplicaciones disponibles son aún, estadísticamente, insuficientes como basamento experimental de las regularidades empíricas formuladas matemáticamente, y más aún, para la modelación definitiva del proceso de migración vertical de iones metálicos, no obstante, ellas permiten, a priori, el establecimiento de un conjunto de posibilidades (las más favorables) para cada esfera de aplicación. Así, se tiene:

Exploración de hidrocarburos:

- ✍ Detección a distancia, a partir de Imágenes Satelitales, de las anomalías metálicas producidas por la migración vertical del hidrocarburo entrampado (trampas estructurales o estratigráficas) a cualquier profundidad.
- ✍ Cartografía detallada de la proyección vertical del reservorio, permitiendo establecer, con aproximación, la calidad de hidrocarburo entrampado (Grado Redox o Equivalente Inorgánico API).
- ✍ Determinación del tipo de trampa estructural (contra-falla, domal o antifórmica), sus características geométricas aproximadas, y su profundidad con un 10-14% de precisión.
- ✍ Estimación volumétrica del reservorio a partir de los resultados de la Cartografía Detallada.

Exploración de minerales metálicos:

- ✍ Detección a distancia, a partir de Imágenes Satelitales, de las anomalías metálicas producidas por la migración vertical de iones provenientes de ocurrencias a cualquier profundidad.
- ✍ Cartografía detallada de la ocurrencia [proyección vertical del(s) cuerpo(s) mineral(s) y de sus partes enriquecidas, más potentes o próximas a la superficie].
- ✍ Estimación de la composición y calidad (ley media) de la ocurrencia.
- ✍ Estimación de la profundidad, buzamiento y extensión vertical del cuerpo mineral principal, con un 12-18% de precisión.
- ✍ Estimación de recursos.
- ✍ Evaluación de la presencia de mineralización primaria debajo de una zona de oxidación o una escombrera.

Estudios medio-ambientales:

- ✍ Detección a distancia, a partir de Imágenes Satelitales, de las anomalías metálicas producidas por fuentes contaminantes superficiales o subsuperficiales de gran extensión.
- ✍ Cartografía detallada de la zona contaminada, permitiendo establecer su naturaleza (superficial o subsuperficial) y grado.

- ✍ Determinación aproximada de las características geométricas de la fuente contaminante subsuperficial y de su profundidad, con un 14-22% de precisión.

Estudios arqueológicos:

- ✍ Localización precisa de los enterramientos metálicos y estimación de su composición.
- ✍ Determinación de la profundidad de los objetos, con un 14-22% de precisión.

II.3. El Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos.

La invención de la Medición in situ del Potencial Redox en suelos tuvo lugar en Cuba en el año 1993 [Alfonso, J. R., Pardo, M., et al. (1993)], siendo diseñada con fines de la detección de la columna de ambiente reductor formada sobre las acumulaciones de hidrocarburos donde, en correspondencia con los mínimos de Potencial, se observaban, también, incrementos de la Susceptibilidad Magnética del suelo. En el año 1994, se estableció un comportamiento análogo sobre las ocurrencias metálicas [Pardo, M., Millán, G. Álvarez, H., et al. (1994)] pero no fue hasta 1996 [Birell, R. (1996)], en que este fenómeno se asoció con *La Migración Vertical de Iones Metálicos* hacia el suelo, desde las ocurrencias (Fig. II.1). Sólo entonces, se identificó esta técnica electroquímica, según sus principios, con los métodos geoquímicos CHIM y MPF (URSS) y MMI (Australia) [Moon, C. J., Khan, A. (1990); Mann, A. W. (1997)].



Figura II.1. Esquema representativo del Principio de la Migración Vertical de Iones Metálicos.

1. Es así, que desde una etapa temprana de las investigaciones (1996), la observación de mínimos de Potencial Redox asociados tanto a ocurrencias de

hidrocarburos como de minerales metálicos, sugirió su relación a la común naturaleza metálica de las fuentes, planteándose la siguiente hipótesis de trabajo, valida, en nuestra opinión, hasta el presente: “Toda fuente de elementos metálicos es un emisor continuo de iones rápidos que migran verticalmente hacia la superficie, formando una columna dentro de los límites geométricos de la fuente. De ahí que *La Migración Vertical de Iones Metálicos* sea considerado un fenómeno natural, como lo es la Gravedad, que ocurre continua e indistintamente para cualquier fuente metálica, a cualquier profundidad, siendo solo función de sus características (composición, concentración, parámetros geométricos y de yacencia); y siendo las leyes que la gobiernan específicas y no conocidas. Si la fuente metálica yace por debajo o al nivel del manto freático, la columna iónica resultante se convierte, al mismo tiempo, en una columna reductora, producto de la afluencia de electrones hacia ésta. De yacer la fuente en la zona aireada (por encima del manto freático), se forma una columna oxidante como resultado de la pérdida de electrones. Puede darse el caso de la coexistencia de ambas situaciones, por ejemplo: presencia de mineralización primaria por debajo de una escombrera o una zona de oxidación. La regularidad en la relación funcional del Potencial Redox y la concentración superficial de elementos químicos con la profundidad y características de las fuentes, es de un modelo exponencial como controlador de esta migración vertical, en lugar de un modelo logarítmico, como correspondería esperar si el proceso estuviese gobernado por los principios de la difusión, tal y como sugieren algunos autores [Smee, B. W. (2003)].

De forma paralela a los estudios anteriores, se han reportado respuestas pedogeoquímicas y columnas reductoras, sobre mineralizaciones en áreas con una potente cubierta glacial [Hamilton, S. M. (1998); Hamilton, S. M., Cameron, E. M., et al. (2004)]. Estas respuestas son difíciles de explicar fuera del marco de *La Migración Vertical de Iones Metálicos* rápidos, debido a la gran potencia y a la joven edad de los depósitos glaciales que intervienen, los cuales requieren de procesos geoquímicos que operen muy rápidamente, solo en unos pocos miles de años, sobre significantes distancias verticales. Un investigador [Hamilton, S. M. (1998); Hamilton, S. M. (2000)] ha propuesto para ello un interesante modelo que

involucra procesos electroquímicos (gradientes de Potencial Redox) como la fuente subyacente de energía que promueve el transporte de los elementos metálicos hacia la superficie a partir de las ocurrencias y, al mismo tiempo, postula que ese gradiente de potencial es, también, el mecanismo conductor para la redistribución de los elementos químicos en el recubrimiento, tratando así de explicar las anomalías geoquímicas de diferente naturaleza que tienen lugar en el mismo.

II.4. Escenarios a distancia no convencionales : Aerogeofísicos y Satelitales.

Los escenarios aerogeofísicos no convencionales guardan relación, como regla, con el uso de índices integrados de probada efectividad geológica implementados en diferentes campos físicos, siendo de los más conocidos, los escenarios aerogammaespectrométricos (AGE) (Fig. II.2). Los antecedentes en el empleo de los escenarios aerogeofísicos para la prospección petrolífera se remontan a las décadas de los cuarenta y cincuenta, donde se utilizó la radiometría aérea (mínimos de conteo total sobre las áreas de producción e incrementos relativos en su periferia) para cartografiar depósitos de hidrocarburos [Kilmer, C. (1983)].

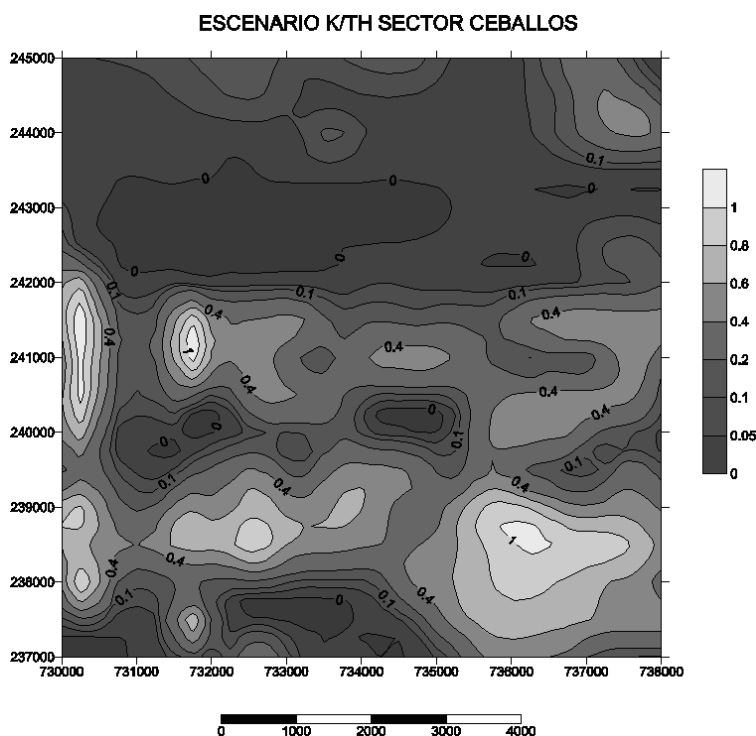


Figura II.2. Escenario AGE de la relación K/eTh con fines petrolíferos.

En las décadas de los 70 hasta los 90, se desarrollaron los métodos aerogammaespectrométrico de alta sensibilidad (mínimos de potasio y máximos de uranio sobre áreas productoras; máximos de potasio sobre escapes de metano; relaciones thorio-normalizadas para suprimir los efectos litológico-ambientales e índices integrados para la cartografía de áreas productoras) además del levantamiento aeromagnético de alta precisión (anomalías micromagnéticas) [Gregory, A. F. (1956); Kilmer, C. (1983); Saunders, D. F., et al. (1989); Lufriu, L., et al. (1989); Saunders, D. F., et al. (1993); Saunders, D. F., et al. (1994); Saunders, D. F., et al. (1999); Schumacher, D. (1999)].

Las características del patrón aerogammaespectrométrico observado sobre una ocurrencia petrolífera son las siguientes: Patrón central-periférico, conformado por valores disminuidos de potasio coincidentes con valores de fondo de thorio en el área productora. En la periferia, ocasionales máximos de potasio, relacionados con escapes de metano en la zona de fuga, coincidentes con valores de fondo de thorio. Para el índice integrado K/eTh entonces, es característico un mínimo central con algunos máximos periféricos.

El referido comportamiento anómalo tiene su fundamento en los siguientes aspectos, según [Saunders, D. F., Branch, J. F., Thompson, C. K. (1994)]: La oxidación microbiana de los hidrocarburos ligeros que alcanzan la superficie producen iones hidronium (H_3O^+) en las aguas subterráneas. Estos parecen reemplazar en una solución ácida a los iones potasio de las arcillas (fundamentalmente, illita) y los liberan para ser lixiviados por las mismas aguas. Por su parte, el thorio permanece estable en su distribución original en los minerales pesados insolubles. Como una consecuencia, es de esperar que la relación de los atributos K/eTh resulte informativa (por sus valores mínimos) del medio afectado por el proceso antes descrito.

Los factores que favorecen la utilización de los Escenarios Aerogammaespectrométricos (AGE) en Cuba son los siguientes: Existencia de un levantamiento aerogammaespectrométrico con altura de vuelo 70 m y distancia entre líneas 500 m para todo el territorio nacional; relieve predominantemente llano; vegetación, fundamentalmente, de arbustos o cultivos y; desarrollo de suelos residuales

(cortezas de intemperismo) autóctonos. No obstante, la efectividad geológica demostrada en sus aplicaciones petrolíferas en Cuba, esta en el orden del 50-65%.

Dentro de las principales limitaciones que se señalan a este tipo de escenario están: La influencia de las variaciones en la litología (con la especial afectación por la presencia de suelos ferruginosos), cubierta vegetal, humedad de los suelos, geometría de radiación y el desconocimiento preciso de la naturaleza mineralo-geoquímica del patrón anómalo observado. El primer factor es el más importante de todos, pudiéndose controlar mediante la comparación con los mapas geológicos y de suelos a la escala del levantamiento.

Los antecedentes del empleo de los escenarios satelitales para la exploración de hidrocarburos datan de la década de los 70, donde se describe el uso de los sensores remotos combinando, generalmente, el análisis estructural (para la detección de trampas y vías de migración de fluidos) y la interpretación tonal como estudio directo. Z. Berger (1994), presenta excelentes ejemplos en C. R. Capote (1997), donde son combinados datos de sensores remotos, geofísicos y geológicos de campo, demostrando la extrema importancia del análisis integrado para el examen de las más diversas situaciones estructurales y de grado de interpretación. La interpretación tonal o estudio directo es posible cuando las microfiltraciones de hidrocarburos ligeros o la ocurrencia superficial o subsuperficial de fuentes termo-minerales vinculadas a las ocurrencias más profundas, son responsables de las alteraciones superficiales en las rocas, suelos y vegetación. Las experiencias más comunes se refieren a áreas de climas templados o fríos, poco húmedos. Metodológicamente, se emplean composiciones de diferentes bandas y de relaciones entre bandas, con el fin de resaltar las zonas de alteraciones superficiales mediante tonalidades más contrastantes. Más recientemente [Van der Werff, H., Lucieer, A. (2003)], se ha conocido de un algoritmo que permite detectar con efectividad las anomalías tonales en imágenes hiperespectrales.

El empleo de los escenarios satelitales para la exploración mineral data de la misma fecha citada anteriormente, siendo los productos más utilizados las

imágenes multiespectrales y térmicas y los sistemas de radar [Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. (1987); Drury, S. A. (1993), en Capote, C. R. (1997)]. El examen de imágenes multiespectrales constituye una herramienta de rutina en la prospección mineral actual, existiendo una vasta experiencia, fundamentalmente, en la geología continental de escudo, con pobre o ninguna cobertura. En los trabajos desarrollados sobre arcos volcánicos, son combinados la identificación de rasgos estructurales y volcánicos, la cartografía de litologías y zonas de alteración hidrotermal y las mediciones de reflectancia en el terreno. Para ello se utilizan imágenes MSS para el análisis estructural, una composición RGB de diferentes bandas para la discriminación litológica y una composición RGB de las relaciones de las diferentes bandas para la separación de las alteraciones hidrotermales. El uso de las imágenes TM hace posible la detección de anomalías tonales y texturales de la vegetación, vinculadas con la litología y las amplias zonas de alteración mineral, pero no ofrecen información para el estudio del stress vegetal dada su limitada resolución espectral y espacial.

Los recientes estudios [Pardo, M. (1991)] sobre la Reflectancia Espectral Reducida por el fondo local (RE_r) en muestras de suelo sobre áreas de producción petrolífera y periféricas, demuestran la existencia de una correlación muy estrecha entre los mínimos de RE_r (para la Banda 1 [485nm], la más informativa) y el incremento en los contenidos de Ni y V, provenientes del hidrocarburo entrampado. Al propio tiempo, estudios análogos pero en objetivos medio ambientales, arrojan una relación entre los máximos de RE_r y los incrementos de Pb (Zn, en menor grado), provenientes de derrames de gasolina que alcanzan el manto freático. Estos hechos dieron pie al diseño de una metodología para el procesamiento de imágenes Landsat (Banda 1), basada en la regionalización del fondo y su sustracción, con el fin de la obtención de imágenes residuales, en las cuales, el carácter de las anomalías tonales (negativas o positivas) podía sugerir la naturaleza del hidrocarburo entrampado en los presuntos reservorios: anomalías negativas- hidrocarburos más pesados (predominio del Ni y el V) y; anomalías positivas- hidrocarburos más ligeros (predominio del Pb y el Zn). Las referidas anomalías residuales tonales (Fig. II.3) permiten, con la cartografía

aproximada de los presuntos reservorios, la planificación argumentada de los trabajos de verificación terrestre (reconocimiento y evaluación) mediante el **Complejo Redox**.

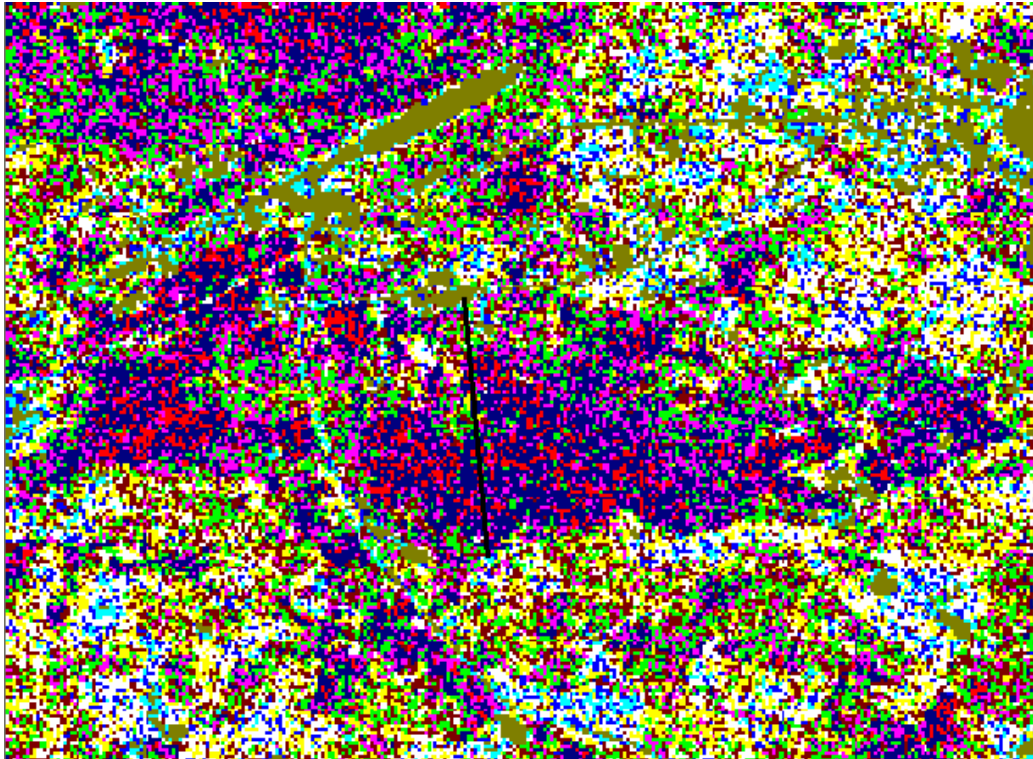


Figura II.3. Escenario Satelital con fines petrolíferos. Se muestra la Línea de l **Complejo Redox**.

La efectividad geológica demostrada, hasta la fecha, para este tipo de escenario esta en el orden entre 80 y el 90%.

El mismo procedimiento descrito en el párrafo anterior es el empleado para el diseño de los escenarios satelitales para minerales, con la particularidad de que se emplean, solamente, las anomalías residuales tonales positivas, puesto que las ocurrencias minerales se expresan como objetos brillosos dentro del fondo local. Estas anomalías permiten una cartografía aproximada de la ocurrencia, propiciando así la planificación argumentada de los trabajos de verificación terrestre (reconocimiento y evaluación) mediante el **Complejo Redox**. La efectividad geológica demostrada, hasta la fecha, para este tipo de escenario está en el orden del 70 -80%.

II.5. Sobre la Metodología de los trabajos del Complejo Redox.

Para la medición in situ del Potencial Redox en suelos (Uredox) (Fig. II.4) se utilizan dos electrodos conectados a un milivoltímetro digital de alta impedancia de entrada (sensibilidad 0.1 mV): uno inerte de platino, y otro de referencia de cobre (electrodo no polarizable - comercial), ubicados inmediatamente próximos, en posición vertical



Figura II.4. Proceso de la medición in situ del Potencial Redox en suelos.

relativa, dentro de un hoyo de 10 a 30 cm de profundidad. La comunicación iónica que cierra el circuito se garantiza a través de la cerámica porosa del electrodo de referencia. Las mediciones con el dispositivo descrito tienen un comportamiento transiente, determinándose el potencial mediante un algoritmo a partir de varias lecturas con una diferencia de tiempo entre ellas constante. Las mediciones se pueden realizar, también, en el laboratorio, empleando un equipo comercial de celda Platino-Calomel, en muestras de suelos, roca o cualquier otro material sólido pulverizado. Si las mediciones se realizan en más de un perfil, solo una parte (30-50%) de las muestras tomadas de los puntos de observación se someten, además, al estudio de la Reflectancia Espectral y al Análisis Químico de elementos metálicos, en el cual, para este último, se utilizan digestiones convencionales y la Espectroscopia con ICP.

La calidad de las observaciones de Potencial Redox se evalúa a partir del error absoluto en la determinación del potencial, considerando un 10% de mediciones de repeticiones efectuadas en los mismos hoyos (o muestras) utilizadas para las mediciones ordinarias. La precisión aceptada para las aplicaciones descritas no debe superar entre los 10 a 15 mV.

La medición de la Susceptibilidad Magnética (Kappa) (Fig. II.5) se realiza con un kappámetro KT-5 (sensibilidad 1×10^{-5} SI), efectuando varias lecturas en el hoyo (o en muestras tomadas de él, con un peso aproximado de 200 g) las cuales se promedian. La calidad de las observaciones de campo se evalúa a partir del error relativo en la determinación del valor medio de Kappa, considerando un 10% de mediciones de repetición en los mismos hoyos (o muestras). La precisión aceptada no debe superar entre el 10 al 15%.



Figura II.5. Proceso de la medición in situ de la Susceptibilidad Magnética en suelos .

La medición de la Reflectancia Espectral (Fig. II.6) se realiza con el Radiómetro Multiespectral CROPSCAN Modelo MSR5, de cinco bandas (485, 560, 660, 830 y 1650) sobre muestras con un peso mínimo de 60 g, empleando un diseño especialmente preparado para esos efectos (luz solar, muestra distribuida según un círculo entre 15 y 20 cm de diámetro sobre una superficie negra y sensor ubicado verticalmente entre 30 y 40 cm sobre la muestra).



Figura II.6. Proceso de medición de la Reflectancia Espectral en muestras de suelos.

La calidad de las observaciones se evalúa a partir del error absoluto en la determinación de la Reflectancia Espectral en cada banda, considerando un 10% de mediciones repetidas al término del trabajo en el día. La precisión aceptada no debe superar el 0.5%.

Los datos de campo del **Complejo Redox** son procesados con el **Sistema Redox** (Fig. II.7), elaborado especialmente para este complejo de técnicas, el cual se vincula con otros sistemas profesionales como MICROSOFT EXCEL , SURFER e ILWIS , para las salidas en forma de gráficos por perfil , planos de isolíneas y el acceso a imágenes (Escenarios Landsat y aerogeofísicos). Las bases de datos son creadas en Access y se convierten al formato XYZ.

Microsoft Access - [Tabla Proyecto]

Proyecto a Servicio: Majagua 2

INFORMES

- IGP
- ONRM
- Ceinpet
- EPEP Majagua
- (ninguno)

AUTORES

- Pardo Echarte Manuel
- (ninguno)

SECTOR

Sector	EscalaHor	Cono	No Hoja	Nombre Hoja	DistLineas	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	Provincia
Morón	40000	Norte	4482-II	Morón	0 N	V	(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	Ciego de Avila
San Miguel de Bagá	40000	Norte	4780-III	San Miguel de Bagá	0 N	V	(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	Camaguey
(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	0	(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)

LINEAS

Linea	Fecha	Hora I	Hora T	DistEstacas	Acumut	PFO	PFC
California	01-Mar-03	7.45	12.45	200	45	20	0
(ninguno)				0	0	0	0

ESTACAS

Estaca	Muestra	LonG	LonM	LonS	LatG	LatM	LatS	CoordX	CoordY	Tipo de Suelo	Observaciones
0	65	77	20	25	21	22	47	879530.49	177475.06	(ninguno)	
300	64	77	20	32	21	22	42	879332.61	177316.42	(ninguno)	
600	63	77	20	37	21	22	39	879190.84	177220.68	(ninguno)	
900	62	77	20	43	21	22	35	879021.02	177093.49	(ninguno)	Entronque Yumaisí
1100	61	77	20	49	21	22	31	878851.19	176966.31	(ninguno)	
1200	60	77	20	55	21	22	28	878690.61	176869.87	(ninguno)	
1500	59	77	21	1	21	22	44	878495.88	177357.66	(ninguno)	
1700	58	77	21	7	21	22	20	878340.94	176615.52	(ninguno)	
1900	57	77	21	13	21	22	16	878171.1	176488.34	(ninguno)	
2100	56	77	21	19	21	22	12	878001.28	176361.17	(ninguno)	
2300	55	77	21	25	21	22	8	877831.41	176233.99	(ninguno)	
2500	54	77	21	31	21	22	4	877661.57	176106.82	(ninguno)	Lomita P-100
2700	53	77	21	37	21	22	0	877491.71	175979.65	(ninguno)	A 100m entronque La Oriental

Figura II.7. Interfase de adquisición de datos del **Sistema Redox**

II.6. Sobre la Interpretación de los datos del **Complejo Redox**.

La interpretación de los datos del **Complejo Redox** involucra la identificación del incremento de los elementos metálicos *constituyentes básicos* (del reservorio, de la mena, de la contaminación o del objeto metálico) que migran desde la fuente, con respecto al fondo local de los elementos químicos característicos de los suelos residuales (cortezas de intemperismo), los cuales pueden, además, estar afectados por diversos tipos de alteraciones vinculadas con la propia fuente. Ésto es, también, válido para los atributos medidos (Uredox, Kappa y RE), donde el problema de la interpretación considera la identificación, en términos de gradientes (incrementos o decrementos respecto al fondo local), del comportamiento de cada atributo ante la contribución anómala de los elementos metálicos *constituyentes básicos* provenientes de la fuente. De ahí, que resulte pertinente tratar con atributos reducidos o normalizados con respecto al fondo local (en dependencia de

que la distribución característica para el atributo medido sea normal o lognormal). Un aspecto importantísimo resulta, entonces, la objetiva y correcta determinación de los diferentes niveles de fondo, los cuales determinan, en última instancia, la precisión de las estimaciones cuantitativas; es por ese motivo, que se ha diseñado un sofisticado algoritmo que permite la determinación del nivel de fondo de todos los atributos considerados. Por otra parte, el nivel de fondo varía espacialmente dentro de los límites de la ocurrencia y su periferia, siendo mayor sobre la parte central (más próxima, potente o enriquecida) de la misma y disminuyendo, paulatinamente, hacia el exterior. De ese modo, un criterio cualitativo para valorar la proximidad a una ocurrencia (o a sus partes con mayor espesor o enriquecidas) es el gradual incremento de los niveles de fondo de los elementos metálicos *constituyentes básicos*, o la disminución progresiva del nivel de fondo del Potencial Redox (aumento del ambiente reductor).

La interpretación de los diferentes atributos (reducidos o normalizados) de **Complejo Redox** exhibe sus propias particularidades, las cuales se resumen a continuación:

- ✍ La Susceptibilidad Magnética Normalizada por el fondo local (K_n) exhibe máximos asociados a la columna de ambiente reductor sobre reservorios de hidrocarburos, ocurrencias minerales y contaminaciones al nivel del manto freático, fundamentalmente, debido a que este ambiente reductor favorece la conversión de los minerales de hierro no magnéticos (hematita, pirita) en variedades magnéticas diagenéticas más estables (magnetita, maghemita, pirrotina y griegita). Como excepciones, se observan máximos y mínimos de naturaleza litológica, en los casos de zonas con alteraciones magnetíticas, vetas cuarzo auríferas, cromitas podiformes y cienos contaminados en ambientes reductores superficiales, entre otros. La amplitud y morfología de los máximos de interés es función de la composición, grado, profundidad y características geométricas de la ocurrencia.
- ✍ El Potencial Redox Reducido por el fondo local (U_r) exhibe mínimos asociados a la columna de ambiente reductor sobre reservorios de

hidrocarburos pesados, ocurrencias minerales, contaminaciones al nivel del manto freático y a zonas de ambiente reductor superficial. Sobre reservorios con hidrocarburos más ligeros, el potencial presenta un carácter desarticulado, con máximos asociados a los microescapes gaseosos. Sobre zonas de oxidación de ocurrencias minerales y contaminaciones metálicas superficiales se observan máximos. La amplitud y morfología de las anomalías de interés es función de la composición, grado, profundidad y características geométricas de la ocurrencia. El Potencial Redox Reducido resulta insensible a las variaciones del relieve, la litología y la tectónica, siendo el nivel de fondo del potencial característico del tipo de ambiente geológico (volcánico, oceánico, sedimentario y/o metamórfico). Aunque en Cuba, por lo general, los suelos estudiados son del tipo residual, se dispone de una experiencia exitosa sobre una cobertura transportada reciente, en el caso del yacimiento de petróleo Varadero. Las únicas fuentes de ruido conocidas hasta el presente son las zonas cenagoso – pantanosas secas, las acumulaciones de material orgánico y los aluviones con alto contenido de elementos metálicos, los cuales producen anomalías muy intensas (≈ 100 mV) de gradientes pronunciados (>1.5 mV/m) y simétricos, identificables, además, a partir de la observación directa en el terreno.

✍ La Reflectancia Espectral Reducida por el fondo local (RE_r) exhibe, como regla, mínimos asociados al incremento del contenido de los elementos metálicos en el suelo, como consecuencia de su oscurecimiento. Ocasionalmente, minerales claros como el cuarzo, la calcita, el caolín y otros, de naturaleza litológica, y/o algunos elementos metálicos brillantes, son los responsables de que se observen máximos. La amplitud y morfología de las anomalías de interés es función de la composición, grado, profundidad y características geométricas de la ocurrencia.

✎ El contenido normalizado por el fondo local de los elementos metálicos *constituyentes básicos* en el suelo (C_n) exhibe incrementos sobre la proyección vertical de las ocurrencias de hidrocarburos y minerales (incluyendo zonas de oxidación), así como también, sobre contaminaciones al nivel del manto freático. La relación entre los distintos elementos mayoritarios (paragénesis) es función de la composición de la ocurrencia. La amplitud y morfología de los incrementos depende del grado (ley), profundidad y características geométricas de la misma. Para las contaminaciones superficiales el tipo y grado es determinable directamente.

II.7. Sustentación empírica del **Complejo Redox**.

Las bases para la interpretación cualitativa y cuantitativa de los datos del **Complejo Redox** descansan en regularidades establecidas por vía empírica a partir de un número de casos de estudio aun no representativo desde el punto de vista estadístico. Así, para el **Complejo Redox** han sido formuladas las expresiones matemáticas empíricas que relacionan los distintos atributos medidos (reducidos o normalizados) con la profundidad, la geometría y el grado (ley) de los elementos metálicos *constituyentes básicos* presentes en el hidrocarburo entrampado, la mineralización o la contaminación. Estas expresiones deben ser "calibradas" para cada *Play, Campo Mineral o Zona de Contaminación*, a fin de lograr un ajuste más efectivo de los parámetros de interpretación cuantitativa. Con tal propósito se realizan, previo a acometer la prospección (el estudio), los trabajos de modelación (Fig. II.8) mediante un perfil sobre objetivos conocidos en las Áreas de Control.



Figura II.8. Áreas de Control donde fueron calibrados cada *Play*, *Campo Mineral* o *Zona de Contaminación*.

II.8. Relaciones Funcionales Empíricas de los atributos del **Complejo Redox**: La Medición In Situ del Potencial Redox en suelos y la Interpretación Cuantitativa de los Parámetros Inherentes a la fuente metálica.

II.8.1. Potencial Redox Reducido. Expresiones Matemáticas.

1. Expresión general de la Respuesta Transiente de la Medición in situ del Potencial Redox en suelos:

$$U_r(t) \propto A_o E_{r_o} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Donde A_o y τ son función lineal (inversamente proporcional) de la Conductividad Reducida (C_r) del suelo, resultando indicativos de mineralizaciones metálicas muy próximas a la superficie (valores mínimos de A_o y τ , similares y repetidos en estaciones contiguas). La dependencia lineal entre A_o y C_r (para valores de C_r entre 25 y 105 mhos) es la siguiente:

$$C_r \propto 2.9261A_o - 103.01$$

2. Expresión general de la Dependencia del Potencial Redox Reducido con la Profundidad (H), el Espesor (P) y la Concentración de Metal de la fuente (C):

$$Ur(H, P, C) = (212e^{\frac{80}{H}})H^{0.15}e^{0.0005H}e^{\frac{P}{H}}e^{\frac{C}{H}} \quad [II.1]$$

Donde $A = (212e^{\frac{80}{H}})$

El uso de esta expresión general varía en dependencia de la esfera de aplicación (petróleo, minerales y medio -ambiente/arqueología), para lo cual se consideran tres niveles medios de profundidad: 1000 m, 100 m y 10 m, que al ser evaluados en la expresión, se obtienen los valores del coeficiente A ya conocidos previamente por vía empírica: 196, 95 y 0.07. También el tipo de aplicación (profundidad media de la fuente) permite asumir consideraciones que simplifican la expresión [II.1]. Así, para petróleo, se puede asumir que la concentración metálica en la fuente es constante ($\frac{C}{x} = \frac{C}{y} = \frac{C}{z} = 0$), es decir que no existe variación de la concentración metálica en cualquier dirección, y el espesor del reservorio es muy pequeño en comparación con su profundidad, de ahí que la expresión quede como:

$$Ur = 196H^{0.15}e^{0.0005H} \quad [II.2]$$

, válida para hidrocarburos muy pesados, donde son características las anomalías negativas de intensidad mayor de 30 mV. Para los hidrocarburos pesados -ligeros y ligeros, donde son características las anomalías negativas de amplitud menor a 30 mV se cumple la expresión obtenida por vía empírica:

$$Ur = (5e^{\frac{80}{H}})H^{0.25}e^{0.0005H} \quad [II.3]$$

Para H=1000 m, el Coeficiente A es 4.6.

En los casos de las aplicaciones de minerales y medio -ambiente/arqueología, las simplificaciones anteriores ya no resultan válidas por lo que es necesario disponer de información complementaria sobre el espesor y la concentración metálica del objeto a fin de poder reducir la ambigüedad en la interpretación.

II.8.2. Contenido de Elementos Químicos. Expresiones Matemáticas.

Expresión General de la Dependencia del Contenido Normalizado de Elementos Químicos en el suelo con la Profundidad, el Espesor y la Concentración de Metal de la fuente:

$$C_n = (1039 e^{\frac{80}{H}}) H^{0.25} e^{0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{\frac{C}{H}} \quad [II.4]$$

, donde C_n es la concentración de metal de la fuente.

El uso de esta expresión al igual que la correspondiente al Potencial Redox [II.1], depende de la esfera de aplicación y, como en el caso anterior, considerando los mismos tres niveles medios de profundidad: 1000m, 100m y 10m, se obtienen al evaluar los valores del Coeficiente A: 958, 467, y 0.35. También resultan válidas las simplificaciones de la expresión [II.4] en las aplicaciones de petróleo donde, al hacerse uno los dos últimos términos, la misma queda como:

$$C_n = 958 \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H} \quad [II.5]$$

donde F es el Nivel de fondo local.

De igual manera, para las aplicaciones de minerales y medio ambiente/arqueología las simplificaciones anteriores no son válidas, resultando necesario disponer de información complementaria para reducir la ambigüedad en la interpretación.

En las aplicaciones de petróleo se definió empíricamente, un parámetro indicador de la calidad metálica del hidrocarburo, el cual, por su magnitud, resulta semejante al grado API de madurez del hidrocarburo, denominándosele Grado Redox o Equivalente Inorgánico del Grado API:

$$REDOX = 2.69 F^{0.25} e^{0.0005F} \quad [II.6]$$

, donde

$$F = F_{Ni} F_V F_{Fe} F_{Zn} \cdot 10^8 \quad [II.7]$$

estando expresados los valores de fondo de los distintos elementos en ppm.

En las aplicaciones de minerales y medio -ambiente/arqueología como indicador de la calidad metálica de la fuente superficial se utiliza la expresión empírica:

$$Ley_{med} \approx 10 C_{max} \quad [II.8]$$

donde C_{max} es el valor máximo del contenido en el suelo del elemento *constituyente básico* en cuestión. En el caso del Au, el factor multiplicativo es 3.2, lo cual se explica por su baja insolubilidad.

II.8.3. Relaciones entre Atributos Reducidos o Normalizados. Expresiones Matemáticas.

Se ha comprobado, por vía empírica, la existencia de una dependencia lineal entre la Reflectancia Espectral Reducida (RE_r) y la Susceptibilidad Magnética Normalizada (K_n) con el Contenido Normalizado de elementos químicos en el suelo (C_n) resultante del proceso de “*Migración Vertical de Iones Metálicos*” a partir de la fuente.

La relación de la RE_r , tiene un vínculo genético directo con la presencia del metal, no así la K_n , la cual tiene un vínculo indirecto a través de la formación de minerales magnéticos diagenéticos originados como resultado de la existencia de la “Columna Reductora”. En el caso particular de objetivos con yacencia horizontal (cortezas de intemperismo, reservorios de petróleo, lentes de contaminación a nivel del manto freático y rocas asfálticas con yacencia horizontal) tiene lugar también la dependencia lineal entre el Potencial Redox Reducido (U_r) y el Contenido Normalizado de elementos químicos en el suelo. La mencionada dependencia lineal entre atributos se expresa, generalmente, como hasta tres rectas de pendientes diferentes las cuales caracterizan el comportamiento del atributo. Las expresiones de estas relaciones lineales son las siguientes:

$$C_n \approx \frac{b_i K_n + (b_i - a_i)}{a_i} \quad [II.9]$$

$$C_n = \frac{b_i RE_r + a_i}{a_i} \quad [II.10]$$

$$C_n = \frac{b_i U_r + a_i}{a_i} \quad [II.11]$$

, donde a_i y b_i son los valores calculados a partir del punto medio perteneciente al lugar geométrico de la recta (dependencia entre atributos) entre el valor extremo de ella y el Punto Pivote.

Esta última expresión es válida solo para objetivos horizontales, donde

$$a_i = \frac{1}{C_n - 1} \quad [II.12]$$

$$b_i = \frac{1}{RE_{r_i} - 1} \quad [II.13]$$

, Siendo i un punto cualquiera de las rectas que definen la dependencia lineal.

Teniendo en cuenta las relaciones anteriores, las expresiones más generales que describen la dependencia de la K_n , la RE_r y el U_r (objetos horizontales) con los parámetros de yacencia, geométricos y de calidad metálica de las fuentes son las siguientes:

$$K_n = \frac{b_i + a_i}{b_i} \left[(1039 e^{\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{\frac{C}{H}} \right] \quad [II.14]$$

$$RE_r = \frac{a_i}{b_i} \left[((1039 e^{\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{\frac{C}{H}}) + 1 \right] \quad [II.15]$$

$$Ur = \frac{a_i}{b_i} \left[\left((1039 e^{\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{\frac{C}{H}} \right) - 1 \right] \quad [II.16]$$

, Esta última expresión es válida solo para objetos horizontales.

De las expresiones anteriores se derivan las correspondientes para las aplicaciones de petróleo:

$$Kn = \frac{b_i}{a_i} - \frac{a_i}{b_i} (958 \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H}) \quad [II.17]$$

$$REr = \frac{a_i}{b_i} \left[(958 \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H}) - 1 \right] \quad [II.18]$$

$$Ur = \frac{a_i}{b_i} \left[(958 \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H}) - 1 \right] \quad [II.19]$$

Y para las aplicaciones de minerales, objetivos horizontales, profundos (100 m) y superficiales (10 m):

$$Kn = \frac{b_i}{a_i} - \frac{a_i}{b_i} \left(\frac{467}{0.35} \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H} e^{\frac{P}{H}} \right) \quad [II.20]$$

$$REr = \frac{a_i}{b_i} \left[\left(\frac{467}{0.35} \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H} e^{\frac{P}{H}} \right) - 1 \right] \quad [II.21]$$

$$Ur = \frac{a_i}{b_i} \left[\left(\frac{467}{0.35} \frac{1}{F} H^{0.25} e^{0.0005H} e^{\frac{P}{H}} \right) - 1 \right] \quad [II.22]$$

Estas expresiones permiten la estimación del espesor del objetivo (su variabilidad) bajo las condiciones de una composición metálica homogénea y una profundidad constante del tope de la fuente.

II.9. Interpretación Cuantitativa

La interpretación cuantitativa parte de los conceptos más generales de Intervalo de Respuesta Anómala del Atributo (**IRAA**) y del Complejo (**IRA**), de Puntos

Singulares (**PS**) y Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (**PARA**). A continuación se definen los mismos, según la experiencia del Experto :

- ✍ Intervalo de Respuesta Anómala del Atributo (**IRAA**): Es el intervalo de puntos de observación donde tiene lugar la respuesta anómala del atributo.
- ✍ Intervalo de Respuesta Anómala (**IRA**): Es el intervalo de puntos de observación donde tiene lugar la respuesta anómala correlacionable en la mayoría los atributos.
- ✍ Puntos de Singularidad (**PS**): Son aquellos puntos de observación dentro del **IRA** los cuales satisfacen el comportamiento anómalo esperado para los atributos. Estos puntos son utilizados para las estimaciones cuantitativas.
- ✍ Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (**PARA**): Son aquellos puntos de observación fuera del **IRA** donde no existe correlación en la respuesta anómala esperada o sencillamente falta la respuesta anómala (por discontinuidad en la fuente). Algunos de estos puntos sirven para establecer los límites de las construcciones geométricas de la fuente y, también, para la estimación del nivel de fondo.

II.10. Proceso de Interpretación.

✍ **Paso 1.** Exámen minucioso de los gráficos y los datos, con el propósito de identificar los **PS**, los **IRAA**, los **IRA**, y los **PARA**. Debe prestarse especial atención dentro de las aplicaciones de minerales y medio ambiente / arqueología a la identificación del ambiente de oxidación, reconocido por la existencia de al menos 3 puntos continuos con valores de $U_r = \text{Fondo} + 15 \text{ mV}$.

✍ **Paso 2.** En la Base de Datos se seleccionan todos los **PS** de los **IRA**, los cuales se utilizan para el establecimiento de las relaciones lineales entre atributos, cuya salida son los valores de a_i y b_i , a ser utilizadas en las estimaciones cuantitativas.

✍ **Paso 3.** Las estimaciones cuantitativas de la profundidad o del espesor se realizan para cada **PS** vinculados a las dependencias lineales para los

atributos, determinando por ponderación, el valor más probable. Una vez realizadas todas las estimaciones ponderadas se procede a la construcción geométrica de la superficie resultante para la cual se emplean, también, los **PARA.**

✍ **Paso 4.** Se procede a la estimación de la calidad de la fuente y, finalmente, a una sencilla estimación de recursos.

III. MODELO MATEMATICO DE L COMPLEJO REDOX.

III. MODELO MATEMATICO DEL **COMPLEJO REDOX**.

III.1. Introducción.

Existen varias definiciones de Modelos . En su sentido más amplio: un modelo abstrae desde cierto aspecto de la realidad. Identifica objetos, relaciones, propiedades y atributos de los objetos, relaciones entre propiedades de objetos [Booch, G. (1996); Gamma, E. et al. (2002); Morales P. y Antonio E. (1984); Reenskaug. T., et al. (1996); Rumbaugh. J., et al. (2000); Zhao. J., Thomas. D. (2004)]. La inteligencia surge de la capacidad de construir y usar modelos, es decir de abstraer. Para Karbach, W. y Linster, M., Voss, A. (1990), es una poderosa abstracción que permite reducir la complejidad de la realidad para focalizarse en ciertos aspectos. Para DeMarco, T. (1982), *"Un modelo refleja, a través de la abstracción de detalle, la características relevantes del sistema en el mundo real"*. Así se ponen de acuerdo en que un modelo usualmente hace referencia a la noción común de abstracción o idealización de un sistema del mundo real. Podemos asumir la siguiente definición: *"sistema representado en la mente o en la realidad, el cual se encuentra en determinadas relaciones con otro sistema (el original)"* [Morales P. y Antonio E. (1984)]. Los modelos matemáticos son aquellos constituidos por ecuaciones, inecuaciones, sus sistemas, gráficas, etc.

En su relación con el objeto original el modelo tiene las condiciones de reflejo o analogía, de representación y de extrapolación, es decir tiene explícitamente expresada una relación de parecido con el original, lo sustituye en los procesos del conocimiento y permite obtener información del mismo.

Puede decirse que la modelación matemática es el proceso de imitar la realidad utilizando el lenguaje de las matemáticas y este lenguaje es lo suficientemente rico como para tratar los más diversos problemas tanto por la materia de su contenido como por su complejidad.

El procedimiento de construcción de un Modelo Matemático efectivo requiere de habilidad, creatividad y evaluación objetiva.

Existen varios criterios sobre las fases o etapas del proceso de modelación, por su simplificación expondremos la propuesta siguiente [Schulcloper, J. R. (1990)]:

?Formulación del Problema. Es la etapa, en la cual debe obtenerse toda la información necesaria y organizarla para poder "expresarla" matemáticamente. Para ello ha de tenerse una comprensión del área del conocimiento del problema lo mismo que de las matemáticas correspondientes. El especialista – máximo responsable de la misma- no debe hacer otra cosa que explicar con el mayor rigor científico, en su lenguaje, pero entendible para los otros el problema a resolver y el medio en que este se ubica [Schulcloper, J. R. (1990)]. En esta etapa, puede que sea necesario la entrevista con personas que no sean matemáticos (conocedores del problema) y a leer la bibliografía pertinente.

?Formulación del Modelo. Claro está, que en la práctica, es imposible evitar que al menos “mentalmente” se vaya ejecutando a medida que el especialista va formulando el problema [Schulcloper, J. R. (1990)]. Esta es una de las etapas más difíciles, pues es donde se requiere “traducir” al lenguaje formal de las matemáticas el problema a resolver. Después que se tiene el problema formulado, del análisis de este debe decidirse cuales variables serán consideradas, aquí se determinará cuáles características del objeto en estudio serán analizadas y cuales no, pues en el modelo solo deben estar representadas aquellas sobre las que se va a influir y las que se utilizarán para lograrlo. Las variables que desechan son las que tienen poco o ningún efecto en el proceso. Esta es una de las razones de que un modelo represente al objeto en estudio solo para las características en estudio. Las variables independientes tienen un efecto significativo y servirán como información de entrada para el modelo. Las variables dependientes resultan afectadas por las independientes y son importantes en la solución del problema. Esta etapa suele clasificarse como la de definición de variables del modelo, su importancia está en que de su elección depende la calidad del modelo como tal, no hay una forma única de escoger las variables de un modelo para el mismo problema,

como tampoco la hay para la construcción de este, pero puede simplificarse mucho el trabajo si se hace con eficiencia. Esto requiere un conocimiento profundo del área y una cabal comprensión del problema.

?Selección del Modo de Solución . Cuando hemos llegado a esta etapa, en la mayoría de los casos, resulta relativamente sencillo la selección del Modelo Matemático, pero puede ocurrir que se tenga en principio más de una forma de solucionarse el problema y la cuestión sería, cuál de ella ofrecería más eficiencia al modelo, lo cual se expresaría por un proceso de iteración a partir de este punto en adelante.

?Solución del Modelo . El próximo paso es resolver el modelo para lo cual es importante que existan métodos para ello que no hagan muy difícil obtener la solución. En esta etapa entran a jugar su papel los diferentes medios computarizados.

?Verificación del Modelo . Una vez obtenida la solución debe verificarse si esta proporciona una respuesta al problema pues de lo contrario habría que revisar todo desde el principio y detectar la dificultad. Cuando sea posible, la validez del modelo puede ser corroborada comparando sus predicciones con datos experimentales. Cada vez que se utilice un modelo se le está sometiendo a una prueba, por lo tanto el proceso no termina mientras se le esté utilizando lo que confirma su carácter cíclico.

Debe tenerse en cuenta que un modelo no es la realidad, sino una representación de ella, es decir, con él estudiamos algunas de las características del fenómeno y la solución que nos dará tiene que ver con estas, si queremos estudiar otras entonces se debe reformular el problema y el modelo. Si el modelo es más refinado proporcionará más información pero la verdadera prueba es su capacidad de encontrar una respuesta aceptable para el problema planteado.

En el proceso de resolución de problemas en que interviene la modelación matemática pueden cometerse dos tipos de errores, uno es tratar de resolver una situación compleja por métodos empíricos intuitivos ofreciendo una solución burda a un problema que requería un modelo; el otro es, por el contrario, tratar de aplicar un modelo a la solución de un problema para el cual no es requerido.

Con las consideraciones anteriores pretendimos reunir los aspectos que consideramos más importantes sobre el proceso de modelación.

Finalmente, queremos exponer las características de la modelación para las Ciencias Geológicas, cuya disciplina científica que pertenece al grupo de las ciencias “*poco formalizadas*” [Schulcloper, J. R. (1990)], entre las que están también: la Medicina, la Biología, la Psicología y otras. Estas características hacen particular el proceso de Modelación Matemática , ellas son:

- ✍ No conocimiento de expresiones analíticas de los vínculos o leyes que rigen el comportamiento de los objetos en el universo en cuestión.
- ✍ No se posee toda la información sobre los factores que influyen en fenómenos que se estudian, y en la mayoría de los casos se desconoce el grado de influencia de los mismos.
- ✍ Por lo general se trabaja sobre la base de criterios múltiples para la solución de los problemas, amén de que la confiabilidad de dicha solución es variable y, en casi ningún caso, absoluta.
- ✍ Es común que los especialistas del área no tengan una única explicación (si existe) de las conclusiones a las que arriban.
- ✍ Por lo general los especialistas en muchos problemas trabajan sobre la base de analogías, es decir, precedentes (parciales o totales) de experiencias y observaciones acumuladas.
- ✍ En los problemas, al describir sus objetos, están presentes tanto variables cualitativas como cuantitativas y, con frecuencia, de forma simultánea.
- ✍ El análisis de los valores de todas estas variables es fundamentalmente cualitativo y se apoya en muchos casos en inferencias no necesariamente modelables con la lógica de las matemáticas clásica.

III.2. El Proceso de Modelación Matemática del **Complejo Redox**.

La característica fundamental de este proceso de Modelación Matemática del **Complejo Redox**, es que se tratará de modelar esencialmente, la experiencia de un Experto.

En la etapa de Formulación del Problema se acopiaron las fuentes de conocimiento: entre ellas la documentación disponible y se focalizaron las que estaban pendientes por localizar, principalmente por vía Internet y otros, pero fundamentalmente, esta primera parte se desarrolló en exhaustivas entrevistas con el Experto.

Se estudió el dominio a partir de estas fuentes, consiguiendo una familiaridad con la especialidad (evitando emplear demasiado tiempo y convertirse en un Experto pues no era el objetivo), y se seleccionaron los elementos clave ya con orientación hacia la identificación de componentes potenciales de modelado.

Las componentes identificadas fueron:

1. Modelación para la determinación del Nivel de Fondo de los atributos.
2. Modelación del Proceso de Interpretación.

III.2.1. Determinación del Nivel de Fondo de los atributos.

Determinar el Nivel de Fondo de un atributo en una serie de observaciones secuenciales en la **Complejo Redox** es una tarea generalmente compleja, dada la insuficiente cantidad de valores de fondo presentes, la cual impide el uso de las herramientas estadísticas convencionales. La solución en este caso está dada, en buena medida, por una significativa carga subjetiva, la cual, en la mayoría de los casos, no es aplicada de forma homogénea. Esto hace que se traten de establecer reglas numéricas generales que modelen su determinación a partir de la experiencia del personal especializado (Expertos).

El Nivel de Fondo de un atributo, bien establecido, permite saber si existen o no anomalías. De esta manera pueden ser separadas y analizadas en su forma y magnitud, logrando, así, segregar el efecto de las posibles fuentes de interés [Pardo, M., Rodríguez, O. (2005)].

El objetivo es el de lograr un algoritmo que ofrezca los pasos ordenados para la determinación numérica del Nivel de Fondo de un atributo en observaciones secuenciales lineales en la **Complejo Redox**, basándose en el análisis heurístico de la experiencia de Expertos. Entre los problemas a resolver están:

1. La detección automática de elementos ráfagas dentro de la secuencia de observaciones.
2. La determinación de qué parte del total de observaciones se tomará para el análisis.
3. La determinación del proceso de depuración final del grupo de observaciones seleccionadas para establecer el Nivel de Fondo .

Se parte siempre de atributos con la característica de ser observados de forma secuencial. Estos datos secuenciales son un conjunto de observaciones a lo largo de una dirección. En esta estructura de observación, no solo es importante los valores de los atributos en cada uno de los puntos de la sucesión sino, también, la posición de cada uno de ellos en su relación con los datos vecinos: delante y detrás de cada uno. En la Figura III.1, se muestra un ejemplo de un gráfico de una secuencia de observaciones de un atributo dado , a lo largo de un Perfil o Línea (color rojo) y el trazado de su Nivel de Fondo (color azul) , ambos desde la estación 0 hasta la 220.

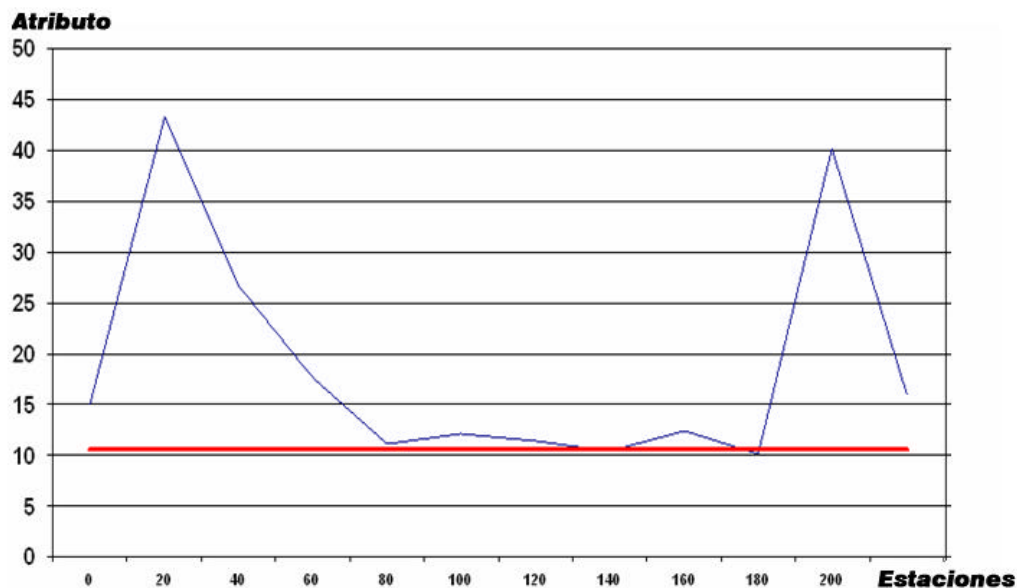


Figura III.1. Ejemplo de secuencia de observaciones de un atributo dado .

En el trabajo se utilizan métodos numéricos de procedencia heurística para resolver los problemas planteados [Davis, J. C. (1986); Lehmann, C. H. (1974); Pardo, M, y Rodríguez, O. (2005); Spiegel, M. R. (1971)].

Los tres problemas a resolver, expresados anteriormente son, en general, las etapas llevadas a cabo por el Experto en el proceso de determinación del Nivel de Fondo, por lo que se pasa a la tarea de transformar este procedimiento de Experto en una Modelación Numérica Heurística (algoritmización) del mismo.

El primer problema se refiere a la detección automática de algún elemento de la secuencia de valores del atributo, que por errores de medición, o de índole natural, su valor sea demasiado grande o pequeño con respecto a los valores que lo antecede y precede (elemento ráfaga). Aquí hay dos problemas que son necesarios aclarar: primero, cuán grande debe ser el valor ráfaga respecto al entorno para que sea considerado como tal y; segundo, cuán amplio será el entorno alrededor del punto sobre el cual se comparará para determinar su categoría de ráfaga.

Según la experiencia, la magnitud del valor considerado ráfaga con respecto a su entorno, debe estar relacionado mediante un coeficiente o índice que dependerá del nivel medio general para la secuencia de observaciones del atributo, es decir, del Valor Medio del Perfil. En la Tabla III.1 se muestra la relación, a partir del Criterio Experto, del mencionado coeficiente el cual debería aplicarse para determinar si un elemento es considerado ráfaga respecto a su entorno. Este coeficiente representará la magnitud que servirá para establecer un intervalo alrededor del valor del punto, es decir, si en la secuencia de datos uno de los elementos posee el valor de X_i y le corresponde un coeficiente de C_i , entonces para que no sea considerado como elemento ráfaga, el elemento predecesor debe cumplir la condición:

$$X_i \geq \frac{C_i X_i}{2} \geq X_{i-1} \geq X_i \geq \frac{C_i X_i}{2} \quad [\text{III.1}]$$

donde X_i es el elemento analizado.

Tabla III.1. Coeficiente que debe aplicarse para determinar si un elemento es considerado ráfaga.

Valor medio de las observaciones	Coeficiente
0.1	0.8
1	0.6
10	0.4
100	0.2
300	0.05

Para este análisis las observaciones del Perfil deben estar ordenadas de modo creciente a partir de su valor y no por el orden espacial de observación.

Con vista a la generalización de la Tabla III.1, se estableció una regresión que arrojó un Coeficiente de Regresión (R^2) de 0.996 y cuya expresión fue:

$$y = 0.0915 \log(x) + 0.5986 \quad [III.2]$$

donde X es el valor del elemento del Perfil

Y es el valor del coeficiente C_i

En la Figura III.2 se presenta el gráfico de la regresión correspondiente a la Tabla III.1.

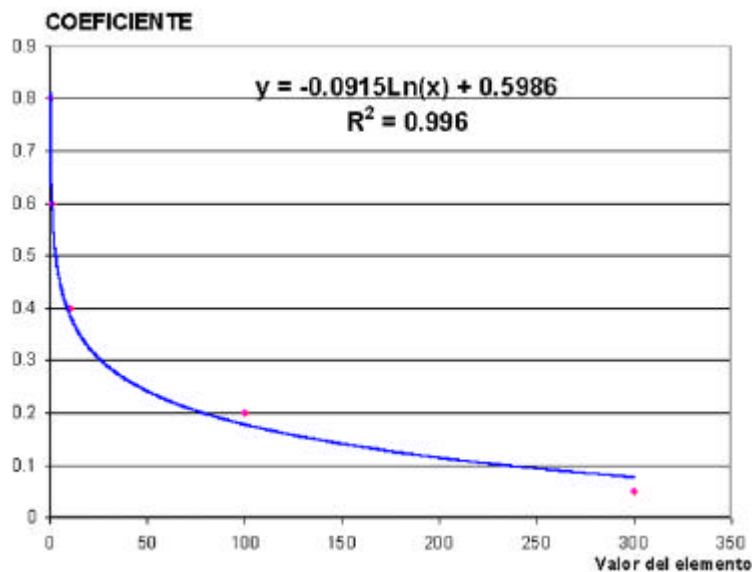


Figura III.2. Regresión resultante de los valores de la Tabla III.1 .

En el segundo problema, se tiene que la experiencia práctica arroja una relación entre el número total de elementos del Perfil (Línea) y el número de las observaciones necesaria para el análisis del Nivel de Fondo . Esta relación se muestra en la Tabla III.2. La regresión formulada para establecer la dependencia expresada en la Tabla III.2 es exacta, es decir, como se puede apreciar en la Figura III.3, la regresión establecida posee un Coeficiente de Correlación igual a uno y la ecuación establecida linealmente es:

$$y = 0.2x + 1 \quad [III.3]$$

donde **X** es el número de elementos del Perfil y **Y** es la Fracción de observaciones tomadas.

Tabla III.2. Relación entre el número total de elementos del Perfil (Línea) y el número de observaciones necesaria para el análisis del Nivel de Fondo .

No. Elementos del Perfil	No. de observaciones tomadas
5	2
10	3
15	4
20	5
25	6
30	7

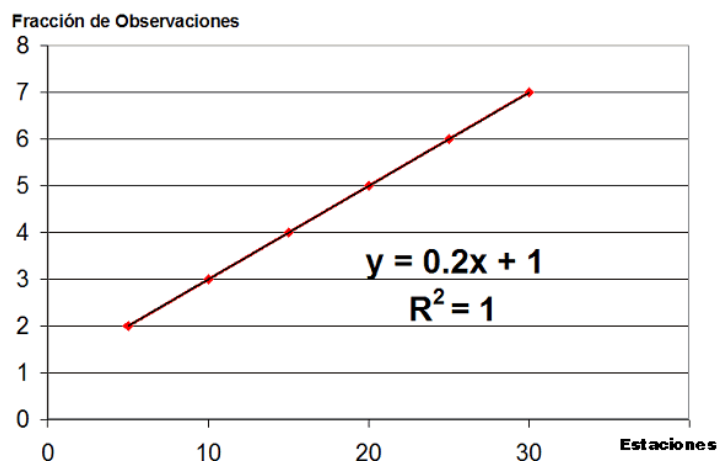


Figura III.3. Regresión resultante de los valores de la Tabla III.2.

Particularmente, el valor de la función debe ser un número entero, decidiéndose, a partir de los resultados prácticos, aplicar a esta función la parte entera del valor calculado, por lo que la relación se modifica así:

$$y = E[0.2x] \quad [III.4]$$

donde $E[...]$ Función Parte Entera

Si se genera esta función para un dominio práctico, digamos desde $x=5$ hasta $x=70$, y se hace el gráfico de la función resultante obtendremos una función creciente a intervalos (Figura III.4).

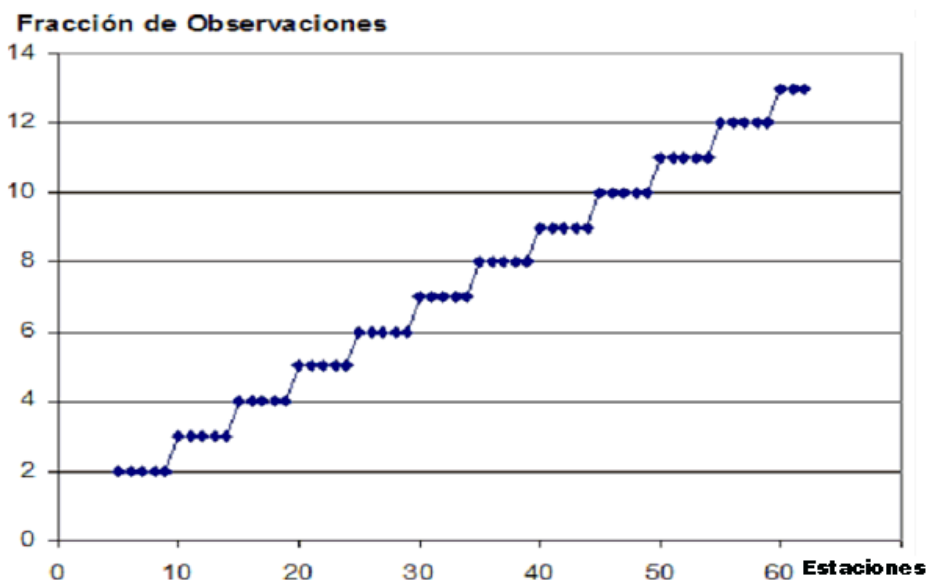


Figura III.4. Función p para determinar el número de observaciones necesarias para el análisis del Nivel de Fondo.

En el tercer problema de análisis, donde es necesario hacer la depuración final del grupo de observaciones seleccionadas para lograr de ellos un valor representativo del Nivel de Fondo, el criterio de depuración pasa, también, por la opinión del Experto. Después de seleccionar un número (n) de observaciones del total (N) del Perfil, a partir de un ordenamiento (creciente o decreciente, en dependencia de si el Nivel de Fondo es por valores menores o mayores), es necesario hacer una depuración (eliminación de los elementos) de este grupo a partir de los elementos más dispersos respecto al Valor Medio entre ellos. Por la experiencia de Experto, se establece una tabla que relaciona el Valor Medio de las

observaciones y el coeficiente a partir del cual se evaluará la permanencia o no de cada uno de los elementos dentro de este grupo (Tabla III.3). A partir de esta Tabla se realizó una Regresión para generalizar el valor del coeficiente para cualquier Valor Medio de las observaciones (Figura III.5). Esta regresión es:

$$y = 1.6649x^{-0.0684} \quad [III.5]$$

Tabla III.3. Tabla que establece la relación de Experto entre el Valor Medio de las observaciones y el coeficiente a partir del cual se evaluará la permanencia o no de cada uno de los elementos dentro del grupo seleccionado.

Valor Medio de las observaciones	Coeficiente
500	1.1
50	1.25
5	1.5
0.5	1.75

Finalmente, el Nivel de Fondo del atributo en cuestión resulta de promediar los valores de las observaciones seleccionadas n , después de ser depuradas mediante el procedimiento anterior.

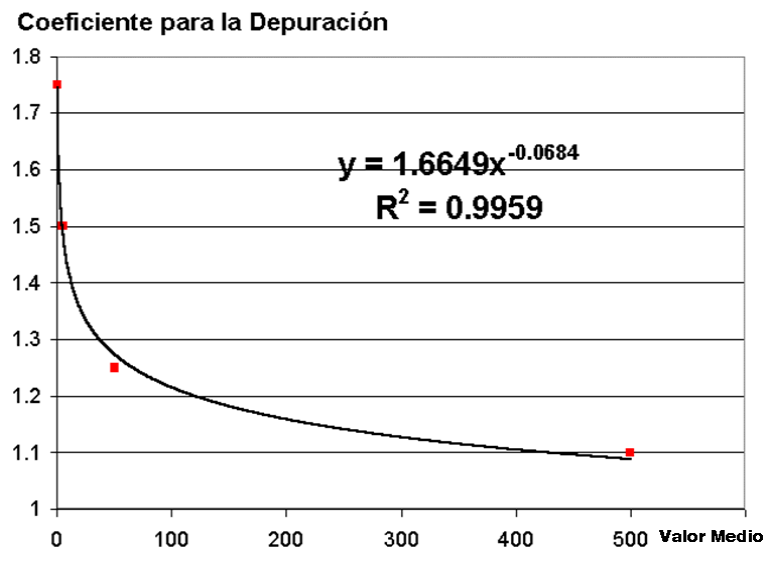


Figura III.5. Regresión para generalizar el valor del coeficiente para cualquier Valor Medio de las observaciones.

Para establecer la medida de eficiencia del algoritmo en la determinación del Nivel de Fondo de un atributo, con respecto a los conceptos establecidos en la práctica por el personal especializado (Expertos), se utilizó la expresión:

$$E = 100 \cdot \frac{X}{Y} \cdot 100 \quad [\text{III.6}]$$

donde **X** es el No. de casos en que el Nivel de Fondo calculado por el algoritmo es >5% al estimado por el Experto, **Y** es el No. de casos en que el Nivel de Fondo calculado por el algoritmo es ≤5% al estimado por el Experto y **E** es el Coeficiente de Acierto del algoritmo con relación a los resultados del Experto. Se analizaron 40 perfiles, como muestra representativa para establecer el Coeficiente de Acierto, tal como se exhibe en la Tabla III.4. y se llegó a los siguientes resultados:

Se tiene en la Tabla III.4., de un lado los valores propuestos por el Experto (columna A), por el otro, el calculado por el Algoritmo (columna B) y, la columna C la cual establece el valor del por ciento de diferencia entre las columnas A y B, por la relación:

$$C = 100 \frac{A - B}{B} \quad [\text{III.7}]$$

Posteriormente se pasa a calcular el Coeficiente de Acierto (E) a partir de la columna C, donde son contados el No. de casos en que el Nivel de Fondo calculado por el algoritmo es >5% al estimado por el Experto (X) y el No. de casos en que el Nivel de Fondo calculado por el algoritmo es ≤5% al estimado por el Experto (Y) donde: X=1 y Y=34, y sustituyendo en III.6 se obtiene:

$$C = 100 \cdot \frac{1}{34} \cdot 100 = 97.44\% \quad [\text{III.8}]$$

por lo que el Coeficiente de Acierto calculado es 97.44%

Tabla III.4. Relación de los Niveles de Fondo establecidos por el Algoritmo y por el Experto para cada uno de los perfiles tomados como muestra, además del Valor absoluto de las diferencias.

Experto	Algoritmo	DIF [%]	Experto	Algoritmo	DIF [%]	Experto	Algoritmo	DIF [%]
A	B	C	A	B	C	A	B	C
0.488	0.488	0.0	5.2	5.5	5.8	0.39	0.39	0.0
349	354	1.4	287.3	287.7	0.1	302.5	307.3	1.6
140.25	140.25	0.0	10.99	11.16	1.5	18.38	18.95	3.1
23.4	22.25	4.9	83.6	81.3	2.8	0.8	0.8	0.0
0.87	0.9	3.4	0.95	0.95	0.0	0.318	0.318	0.0
339.6	342.6	0.9	301.6	307	1.8	310.2	312.6	0.8
1.1	1.1	0.0	8.9	9	1.1	15.16	15.94	5.1
0.46	0.46	0.0	84	84	0.0	3	3	0.0
283.7	289	1.9	85.5	83.3	2.6	73.25	75.6	3.2
0.14	0.14	0.0	1.56	1.57	0.6	5.2	5.14	1.2
382.7	385.3	0.7	17.6	18.1	2.8	280.3	280.3	0.0
14.5	15.3	5.5	0.11	0.1	9.1	12.73	12.73	0.0
0.8	0.8	0.0	128	123	3.9	0.497	0.477	4.0
						0.034	0.036	5.9

III.2.2. Proceso de Interpretación de los atributos

El complejo proceso de interpretación fue dividido –para su mejor desarrollo y comprensión- en varias tareas sucesivas, estas son:

1. Determinación de los Puntos Singulares (**PS**).
2. Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala por Atributos (**IRAA**).
3. Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala del Perfil (**IRA**) y de los Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (**PARA**).
4. Determinación de las dependencias entre los atributos.
5. Estimación de las profundidades bajo los Puntos Singulares.
6. Proceso de depuración de las Profundidades.
7. Clasificación del Intervalo de Respuesta Anómala del Perfil.
8. Geometrización del los resultados.
9. Estimación Volumétrica del modelo.

A continuación describiremos cada uno de estas subsecuentes tareas y la forma en que se modeló su solución.

III.2.2.1. Determinación de los Puntos Singulares (PS).

Existen comportamientos de los atributos a lo largo del Perfil, que marcan una simultaneidad entre ellos para una estación dada, las cuales son importantes para las posteriores estimaciones en la interpretación, estos son los Puntos Singulares (**PS**). Para cada atributo se establece un comportamiento dado. Por ejemplo los atributos como K_n y C_n se definirán los **PS** como máximos relativos y RE_r y U_r como mínimos relativos.

Hay una extensión de esta norma de definición de **PS**, pues puede considerarse también un **PS** el extremo inicial del análisis de un máximo (o mínimo relativo, según el atributo) de una meseta de valores iguales del atributo.

En la Figura III.6 aparece un esquema para los tres casos de **PS**, por ejemplo para K_n y C_n . Se muestra en esa Figura que el pico señalado por "1" es de un valor, el señalado por "2" es **PS** de meseta de dos valores y el punto marcado con "3" es **PS** de meseta de tres valores. Para el caso de RE_r y U_r se considerarán igualmente la extensión de la norma de los **PS**, pero para mínimos relativos de mesetas de un punto y dos y tres puntos de meseta.

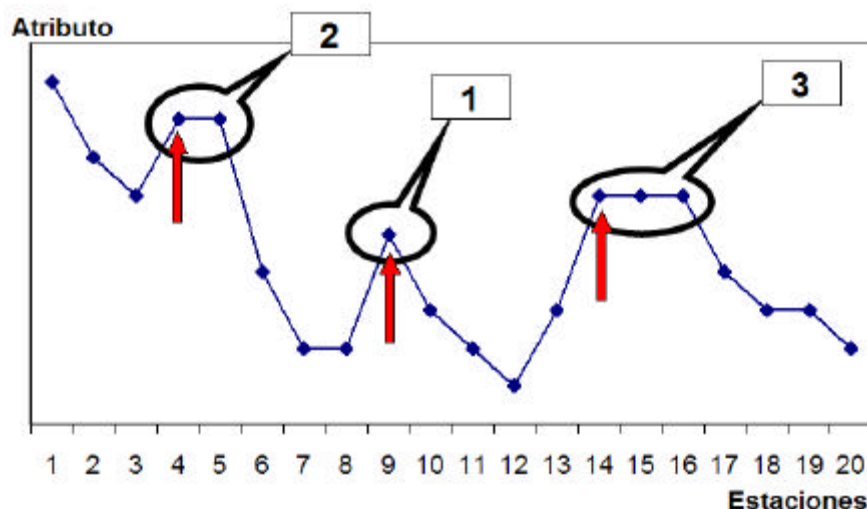


Figura III.6. Esquema donde se muestran las posibles ubicaciones de los tres tipos de Puntos Singulares.

Para el análisis de los **PS** en los extremos de la Línea, se tiene que se considerará un **PS** en el inicio de la Línea, si la magnitud del atributo de la segunda estación es menor (mayor) respecto a la magnitud del atributo de la primera estación. Consecuentemente, habrá un **PS** al final de la Línea si la magnitud del atributo en la penúltima estación es menor (mayor) que la magnitud del atributo de la última estación de la Línea. Como se muestra en la Figura III.7, aparece un **PS** al inicio de la Línea, pues el segundo punto es un valor menor que el primero.

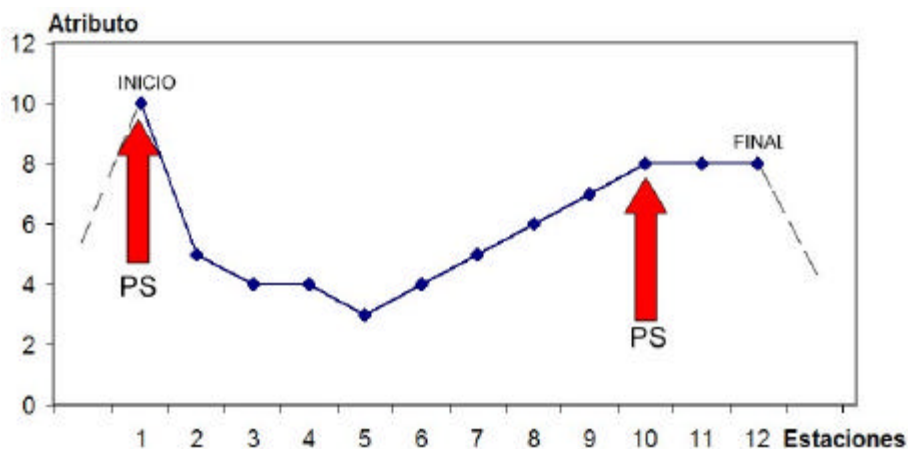


Figura III.7. Línea esquemática donde se muestran los Puntos Singulares incompletos en los extremos.

Posteriormente, cuando se analice una estación de la Línea se hará un conteo de cuántos **PS** de cada atributo coinciden en esa estación, a este valor le llamaremos frecuencia del **PS** y servirá más adelante para caracterizarlo como un valor de peso. Este valor de peso estará entre uno y cuatro.

III.2.2.2. Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala por Atributos (IRAA).

Este es el primer paso de este complejo camino. Establecer cuáles estaciones de representarán el Intervalo de Respuesta Anómala por cada uno de los Atributo. Para ello el Experto estableció una serie de inferencias para cada atributo, las cuales conducen a establecer estos Intervalos de Respuesta Anómala por Atributo.

Las inferencias fijadas globalmente para todos los atributos son:

- ✍ Considerar un Intervalo de Respuesta Anómala por Atributo que tenga tres o más puntos.
- ✍ Los límites del Intervalo de Respuesta Anómala por Atributo esta dado por el punto medio de la zona de gradiente.
- ✍ En cada Perfil o Línea puede existir más de un Intervalo de Respuesta Anómala por Atributo.

Ya en lo particular para cada atributo, este debe cumplir con las siguientes inferencias.

Kappa Normalizado: $K_n = 1.45$

Reflectancia Espectral Relativa: $RE_r = -1$

Potencial Redox Reducido: $U_r < 0$

Elemento Químico Reducido: $C_n = 1.45$

Para que una estación de un atributo dado pertenezca a un **IRAA**, la estación analizada (E_i) debe cumplir estas condiciones, además de su posición, en su entorno (es decir en las estaciones E_{i-1} y E_{i+1}). Si esto no se cumpliera simultáneamente, entonces hay que consultar la información de los **PS**. Si con las inferencias expuestas anteriormente una estación no es un **IRAA**, podría llegar a serlo ocasionalmente si en esta estación existe un **PS**.

III.2.2.3. Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala del Perfil (IRA) y de los Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA).

Para lograr definir el ámbito que se designará como Intervalo de Respuesta Anómala de la Línea, será necesario evaluar cada uno de los atributos y su aporte, por lo que será necesario definir cual será el aporte de cada uno de ellos a partir de su importancia. Para ello el experto definió un Peso para cada uno de ellos, estos son:

- ✍ Peso de Kappa Normalizado: Peso [K_n] = 25%
- ✍ Peso del Potencial Reducido: Peso [U_r] = 25%
- ✍ Peso de la Reflectancia Espectral Reducida: Peso [RE_r] = 20%
- ✍ Peso del Contenido del Elemento Químico Normalizado: Peso [C_n] = 30%

El contenido de elementos trazas constituye el indicio geoquímico indirecto principal de la presencia de hidrocarburos en la profundidad. Los atributos Potencial Redox y Kappa tienen, también, un carácter indirecto pero de segundo orden, porque se refieren a transformaciones secundarias del medio como resultado de la presencia de los hidrocarburos o de los elementos químicos, y la Reflectancia Espectral ocupa un tercer orden por verse afectada, en mayor medida que los restantes atributos, por causas litológicas.

El **IRA** en una Estación estará condicionado por la existencia de los **IRAA** de cada uno de los atributos, afectado estos por el peso correspondiente, es decir:

Estación i

Atributo	Peso	¿Existe IRAA?	
K_n	25	Si $W_1 = \text{Peso}$	No $W_1 = -\text{Peso}$
U_r	25	Si $W_2 = \text{Peso}$	No $W_2 = -\text{Peso}$
RE_r	20	Si $W_3 = \text{Peso}$	No $W_3 = -\text{Peso}$
C_n	30	Si $W_4 = \text{Peso}$	No $W_4 = -\text{Peso}$

Entonces si la suma de los W_i para los cuatro atributos es positivo, entonces la estación i será parte de un Intervalo de Respuesta Anómala (**IRA**), de lo contrario, la estación i será un Punto de Ausencia de Respuesta Anómala (**PARA**).

Si a pesar de que la suma de los W_i para la Estación i sea negativa y represente un **PARA** por este criterio, es posible que pueda ser considerado un punto de **IRA** si para esa estación existe un **PS** global con una frecuencia mayor que uno, esto significa que en esta estación al menos dos atributos posean **PS** cada uno.

III.2.2.4. Determinación de las dependencias entre los atributos.

Las dependencias entre atributos se establecen para relacionar cada uno de los atributos (**RE_r** y **U_r** y **K_n**) con respecto al contenido del elemento químico utilizado (generalmente, el Níquel Normalizado; $C_n = Ni_n$, dado su comportamiento menos errático), es decir, se establecerán las dependencias **K_n** vs **C_n**, **RE_r** vs **C_n** y **U_r** vs **C_n**, donde **C_n** es el contenido del elemento químico utilizado (Figura III.8).

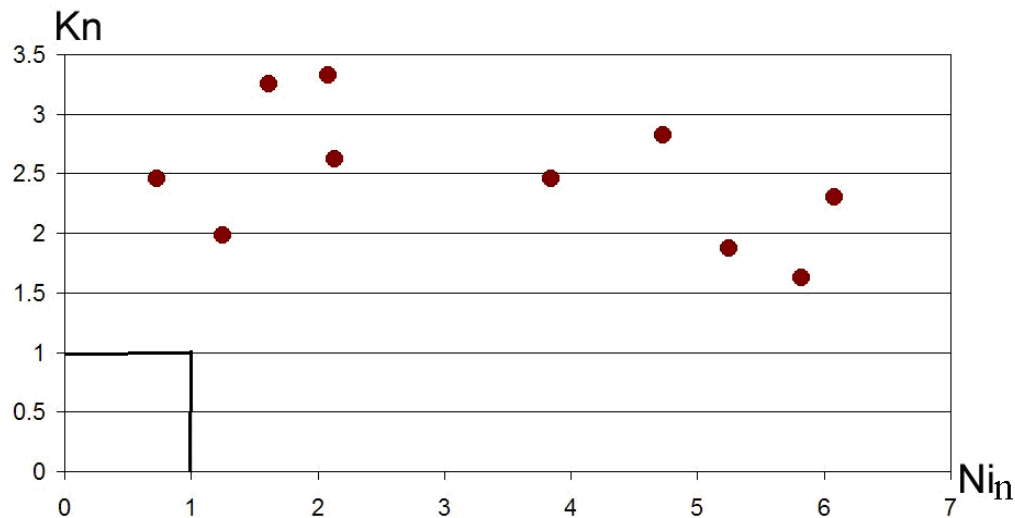


Figura III.8. Ejemplo de dependencia entre Kappa Normalizada y Contenido de Níquel Normalizado.

Cada pareja de valores tomados para la dependencia corresponderá a un **PS**, de esta manera, estableciendo las dependencias lineales entre atributos estaremos preparados para poder estimar cuantitativamente la profundidad del objeto emisor. El trabajo de selección del algoritmo apropiado fue arduo, puesto que los elementos seleccionados para establecer las dependencias lineales, no se ajustaban a los métodos tradicionales de regresiones como la de cuadrados mínimos, por ejemplo. Se trataba de buscar los pares ordenados de la dependencia que poseyeran la mayor colinealidad, es decir, que poseyeran la mayor agrupación angular, lo que implicaba la fortaleza en la determinación de la profundidad de un nivel de emisión del objeto.

En el proceso de ajuste de la dependencia se consideró, de acuerdo con la experiencia del Experto, hasta tres niveles posibles para ser considerados en la interpretación.

El análisis se llevó a cabo de la forma siguiente: por cada par ordenado de la dependencia –por ejemplo- (C_{ni} , K_{ni}) le asociamos el ángulo de la pendiente que pasa entre ese punto y el Punto Pivote. Este punto Pivote representa el punto a partir del cual deben de considerarse los valores de la dependencia para cada uno de los atributos, es decir, el valor de uno para los atributos normalizados (ejemplo:

C_n y K_n) y 0 para los atributos reducidos (ejemplos: U_r y RE_r). Por lo que el Punto Pivote podrá ser (1,1) para la dependencia K_n vs C_n y (1,0) para las dependencias, RE_r vs C_n y U_r vs C_n .

Como está asociado a cada punto de la dependencia (C_{ni} , K_{ni}) el ángulo de la Pendiente que pasa entre ese punto y el Punto Pivote, haremos un análisis de agrupación por estos valores angulares cuyo recorrido s erá desde 0 grado a 90 grados sexagesimales (Figura III.9). Este análisis de agrupación es expresado mediante el cálculo de la matriz de similitud entre los ángulos y la determinación de las agrupaciones resultantes a partir de la proposición de un Umbral por el Experto. Los resultados expresados a partir de la proposición de un valor de Umbral de 15° , estuvieron de acuerdo ampliamente con las dependencias trazadas manualmente por el Experto.

Después de establecidos los grupos resultantes para el Umbral previsto se calcula la media ponderada de los valores angulares de los elementos que conforman cada grupo, y ponderado por el valor de frecuencia con que se manifiestan los **PS** seleccionados. En la Figura III.10, se expone el ejemplo de la dependencia K_n vs N_i para el objetivo de Jatibonico Nuevo . Obsérvese que se trazaron tres niveles, estos están dados por cada una de las tres rectas. Cada una de ellas recoge la mayor linealidad (dentro del Umbral de 15°) para al menos dos puntos de la dependencia (sin incluir el Punto Pivote).

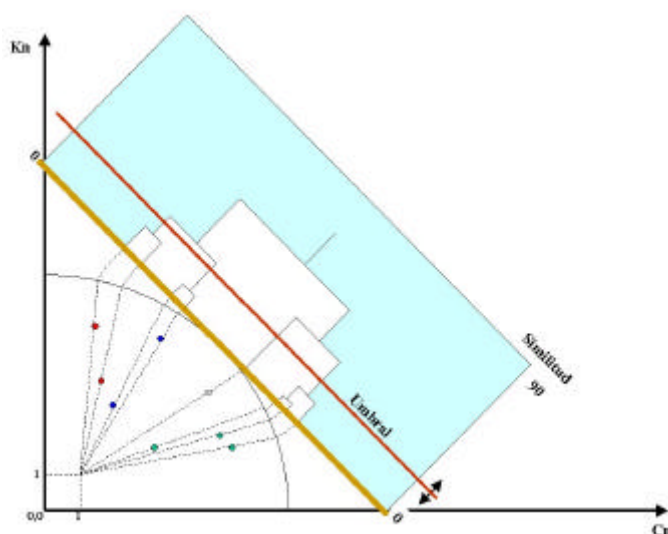


Figura III.9. Esquema del principio de agrupación angular para la determinación de las direcciones fundamentales de las dependencias entre atributos.

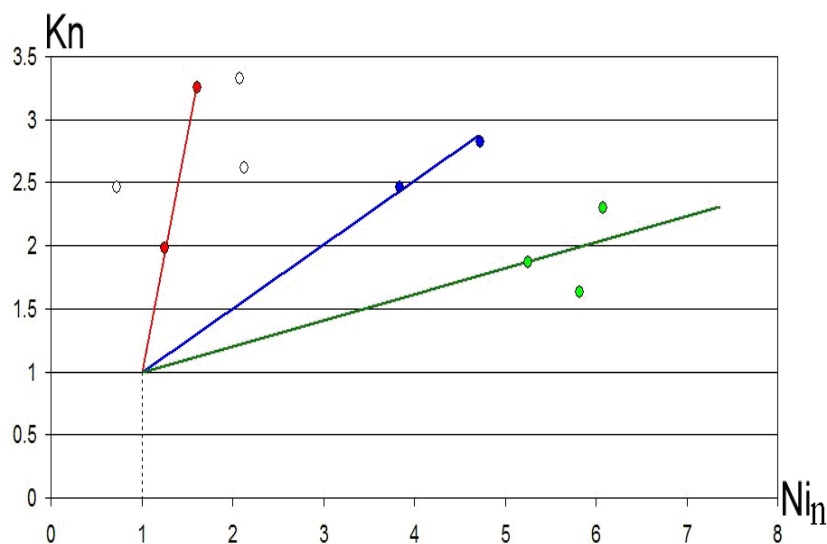


Figura III.10. Ejemplo de la dependencia de Kappa Normalizada y Contenido de Níquel Normalizado para el objetivo de Jatibonico Nuevo .

Para cada una de estas dependencias lineales se estima un punto medio perteneciente al lugar geométrico de la recta entre el valor extremo de ella y el Punto Pivote para así calcular correspondientemente los valores de a_i y b_i (vea la expresión II.12 y II.13). Estos valores de a_i y b_i se utilizarán a su vez para la estimación de las profundidades correspondientes a cada punto asociado a cada recta establecida. Debido a la dependencia lineal que existe entre el contenido de elementos químicos y los restantes atributos, los parámetros a_i y b_i de esa dependencia lineal son los portadores de la información que vincula a la profundidad con los restantes atributos.

III.2.2.5. Estimación de las profundidades bajo los Puntos Singulares.

Con los valores de los atributos (reducidos o normalizados) para cada **PS** seleccionado en las dependencias y los correspondientes a_i y b_i , se evalúan las expresiones II.5, II.17, II.18 y II.19 y se obtienen los valores correspondientes a las profundidades. Esto se realiza mediante un algoritmo de aproximaciones sucesivas, puesto que la expresión III.9 es una función implícita, es decir, que la variable H de la expresión III.9 no es posible expresarla en término de las otras variables. En la Figura III.11 se muestra esquemáticamente el proceso utilizado

para el cálculo de la profundidad. El proceso es el siguiente: se hace variar la profundidad (**H**) desde valores de uno hasta 5000 con un intervalo de un metro. Para cada iteración se tiene un valor de **H_i**, el cual se evalúa en la expresión [II 1.9] correspondiente del atributo en cuestión, es decir, se obtiene un par (**H_i**, **K_{ni}**) y si **K_n^{*}** es el valor del atributo, del cual necesito conocer la profundidad correspondiente, entonces cuando exista en el proceso de iteración un **K_{ni}** suficientemente igual a **K_n^{*}** (esto sobre la base de una diferencia entre ellos de 0.01), entonces tomamos el valor de **H_i** correspondiente al **K_{ni}**.

$$K_{n_i} \approx f(a_i, b_i, F, H_i) \quad [\text{III.9}]$$

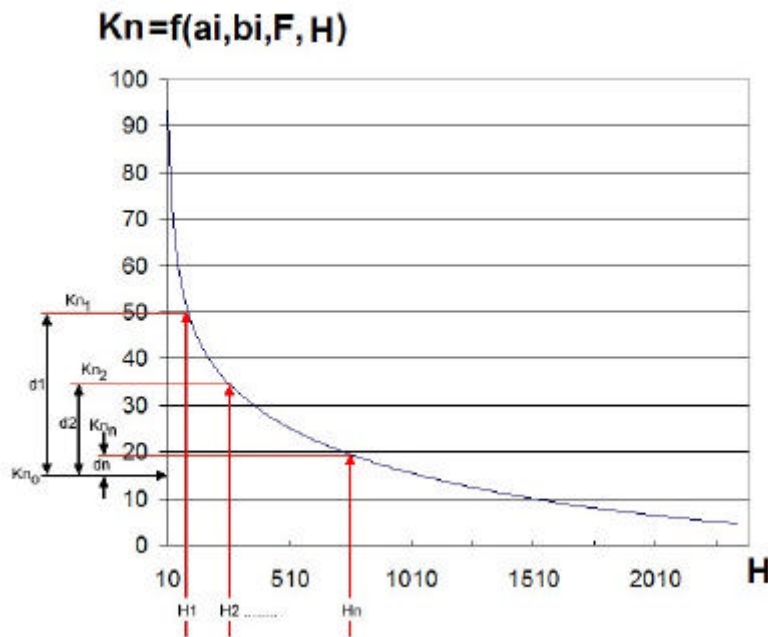


Figura III.11. Esquema que ilustra el algoritmo de aproximaciones sucesivas.

III.2.2.6. Depuración de las profundidades.

En esta etapa es necesario antes de calcular la profundidad referida a un **PS**, considerar cuáles de ellas (las profundidades estimadas para cada atributo en una estación) habría que procesar.

La profundidad referida a un **PS** es la estimada del conjunto de las profundidades que más agrupadas estén, para lo cual se establece un índice de agrupación de un 15% del valor de cada una de ellas. El proceso en general es el siguiente:

1. Se ordenan en orden creciente las profundidades estimadas para todos los atributos referidos a una estación, es decir P_1, P_2, \dots, P_4 , donde $P_i \leq P_{i+1}$.
2. Si la segunda profundidad P_2 es menor o igual a $1.15P_1$, entonces P_2 se va adicionando al grupo que inició P_1 .
3. Si la tercera profundidad P_3 es menor o igual a $1.15P_2$, entonces P_3 se va adicionando al grupo que forma P_1 y P_2 .

Si en el paso uno la Profundidad $P_2 > 1.15P_1$ entonces P_2 comienza a analizarse como la primera Profundidad y así sucesivamente. Si ocurre que $P_{i+1} > 1.15P_i$ entonces no se formaría ningún grupo y solo quedaría tomar la profundidad menor de ellas como representativa.

III.2.2.7. Clasificación del Intervalo de Respuesta Anómala del Perfil.

Para ello se definió por el Experto cuatro Patrones referidos al área de Cuenca Central, por presentar características disímiles entre ellos y disponer de la información completa, en cuanto a atributos, para los mismos, estos son: Yacimiento Cristales, Yacimiento Jatibonico, Sector Jatibonico Nuevo y Sector Jatibonico Oeste.

Se desconoce, si estos patrones son suficientes para describir todas las posibles ocurrencias en la región de Cuenca Central.

Para el análisis de los atributos más informativos, se procesaron los datos mediante un análisis de agrupación no supervisado (Figura III.12) y además se tuvo en cuenta el conocimiento del Experto:

- ✍ El Valor Medio de la Susceptibilidad Magnética Normalizado (K_{n_VM})
- ✍ El Valor Medio del Potencial Redox Reducido (U_{r_VM})
- ✍ El Valor Medio de la Reflectancia Espectral Reducida (RE_{r_VM})
- ✍ El Valor Medio del Contenido de Níquel Normalizado (Ni_VM)
- ✍ El Fondo del Contenido de Níquel Normalizado (Ni_F)
- ✍ El Fondo del Contenido de Hierro Normalizado (Fe_F)
- ✍ El Fondo del Contenido de Zinc Normalizado (Zn_F)
- ✍ El Fondo del Contenido de Vanadio Normalizado (V_F)

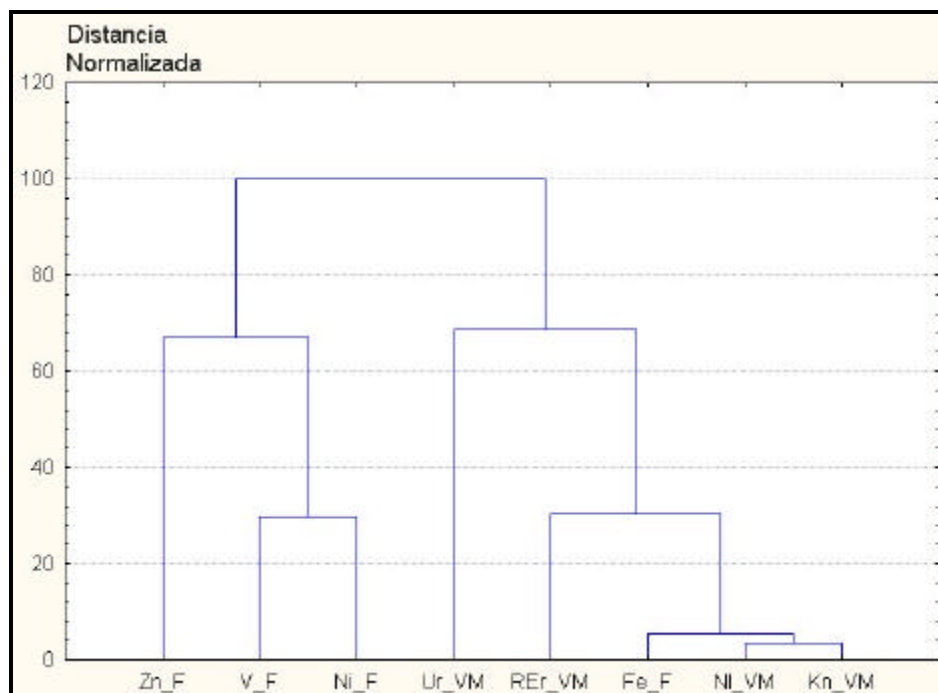


Figura III.12. Dendrograma de la Tabla de Objeto -Propiedades asociada a partir de los atributos.

La Tabla de Objetos/Propiedades (**TOP**) está propuesta en la Tabla III.5 Todos los atributos son numéricos por lo que estaremos trabajando en un Espacio Métrico. A partir de la tipificación de los atributos de la **TOP** (Tabla III.6), podremos establecer una medida de similitud que bien podría ser la Distancia Euclidiana para llevar a cabo el proceso de clasificación. Con los patrones depurados y la medida de similitud propuesta se pasaría a clasificar el objeto que se procesa.

Tabla III.5. Tabla de Objetos/Propiedades (TOP).

Patrones	Kn VM	Ur VM	REr VM	Ni F	Ni VM	Fe F	Zn F	V F
Yacimiento Cristales	3.24	-18.03	-9.20	22.30	2.60	0.94	33.25	31.75
Sector Jatibonico Oeste	2.52	-42.55	-3.96	43.00	1.77	1.81	85.50	55.80
Sector Jatibonico Nuevo	2.22	-12.90	-11.9	19.3	3.67	0.90	52.00	25.75
Yacimiento Jatibonico	2.92	-13.10	-3.73	38	1.82	1.30	45.00	42.33

Tabla III.6. Tabla de Objetos/Propiedades Tipificada (**TOP**^{*}).

Patrones	Kn VM	Ur VM	REr VM	Ni F	Ni VM	Fe F	Zn F	V F
Yacimiento Cristales	1.15	0.26	-0.50	0.15	-0.72	-0.54	-0.27	-0.52
Sector Jatibonico Oeste	-0.46	-1.48	0.80	-0.78	1.06	1.28	1.32	-0.48
Sector Jatibonico Nuevo	-1.13	0.62	-1.17	1.35	-0.98	-1.00	-1.09	1.50
Yacimiento Jatibonico	0.44	0.60	0.86	-0.73	0.63	0.26	0.03	-0.50

Utilizaremos el Método de Componentes Principales , la cual es una técnica de reducción de dimensionalidad lineal que identifica direcciones de la variación máxima ortogonal en los datos originales. Para ello utilizaremos el Software comercial **STATISTIC**.

En la Tabla III.7 se presentan los autovalores de la **TOP** de los Patrones. En la . se observa que de los tres factores, los dos primeros explican un acumulado de casi un 94%, dejando fuera de la influencia del Factor 1 al valor medio de **K_n**. Esto indica que solo la **K_n** está incidiendo en el sistema en una dirección diferente a los demás atributos.

Tabla III.7. Autovalores de la **TOP**^{*} de los Patrones.

Factores	Autovalores	% Total	Autovalores Acumulativo	% Autovalores
1	5.753084	71.91355	5.753084	71.9136
2	1.817354	22.71692	7.570438	94.6305
3	0.429562	5.36952	8.000000	100.0000

En la misma Tabla III.8 se muestran la carga de los dos primeros factores para cada uno de los atributos en cuestión, puede apreciarse que para el Factor 1 todos los atributos excepto **K_n_VM** posee una carga elevada. Por lo que mantenemos la dimensión de la **TOP** y no reducimos los atributos.

Tabla III.8. Carga de los dos factores para cada uno de los atributos. Sombreado o para valores mayores de $|0.77|$.

Atributos	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Kn_VM	0.027598	-0.941990	-0.334504
Ur_VM	0.824756	-0.329206	0.459784
REr_VM	-0.895705	-0.376606	0.236391
Ni_F	-0.968699	-0.126827	0.213394
NI_VM	0.864074	0.502231	-0.033776
Fe_F	-0.990520	0.137307	-0.004038
Zn_F	-0.778216	0.626034	-0.049613
V_F	-0.999031	-0.026583	-0.035083

Para tener una idea de los niveles de asociación entre los atributos y entre los objetos se muestran las Figura III.12 y Figura III.13. El primero de los atributos muestra una gran similitud entre el Ni_n y la K_n , y corrobora el importante vínculo que existe entre estos elementos pues controlan el contenido metálico. Los objetos muestran que los Patrones más parecidos son el del Yacimiento Jatibonico y el Yacimiento Cristales.

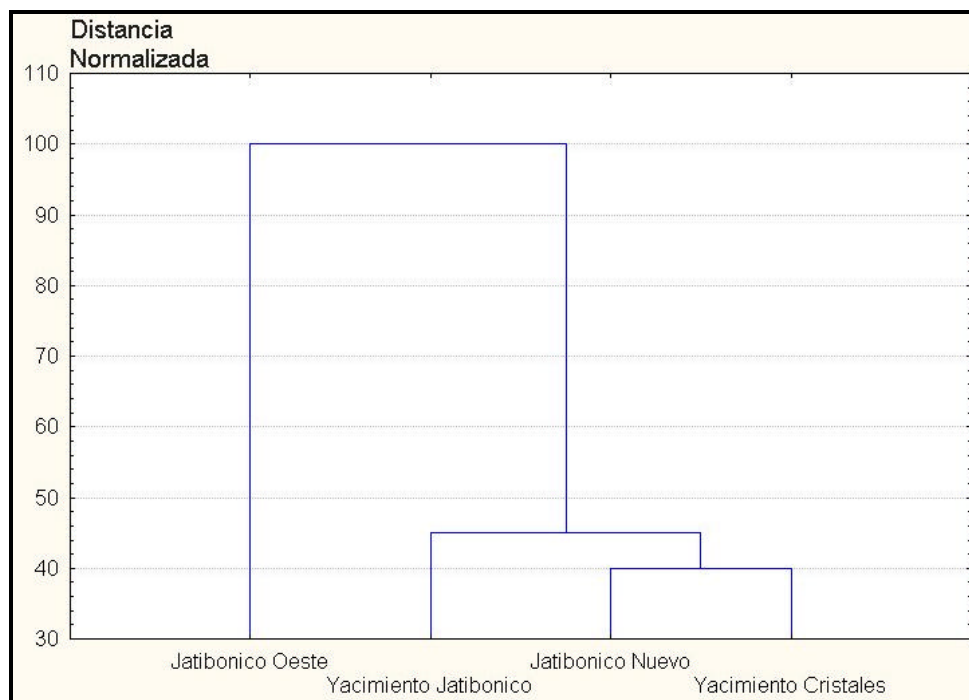


Figura III.13. Dendrograma de la Tabla de Objeto -Propiedades asociada a partir de los atributos.

Como todos los atributos con que trataremos son de naturaleza numérica, es necesario tipificarlos para poder trabajar en un espacio métrico y utilizar la Distancia Euclidiana como Medida de Similitud. Para esto:

Sean los Patrones: **Obj₁**, **Obj₂**, **Obj₃**,... **Obj_n**, entonces, si se describen estos patrones como una Tabla de Objetos -Propiedades se tiene:

$$TOP = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} \cdots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m,1} & p_{m,2} & p_{m,3} & p_{m,n} \end{bmatrix} \quad [III.10]$$

donde, **Obj_k**=**P_{k,1}**, **P_{k,2}**,... **P_{k,n}**, entonces se puede calcular los valores medios [III.11] y la desviación estándar [III.12] para cada atributo:

$$\bar{p}_k = \frac{\sum_{i=1}^n p_{k,i}}{n} \quad [III.11]$$

$$s_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{k,i} - \bar{p}_k)^2}{n}} \quad [III.12]$$

Entonces, se procede a la tipificación de la **TOP** aplicando la expresión [III.13], donde se obtiene una Tabla de Objetos -Propiedades Tipificada (**TOP***)

$$P_{i,j}^* = \frac{p_{i,j} - \bar{p}_j}{s_j} \quad [III.13]$$

La tipificación de cada elemento de la **TOP*** se representarán como:

$$TOP^* = \begin{bmatrix} p_{1,1}^* & p_{1,2}^* & p_{1,3}^* \cdots & p_{1,n}^* \\ p_{2,1}^* & p_{2,2}^* & p_{2,3}^* \cdots & p_{2,n}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m,1}^* & p_{m,2}^* & p_{m,3}^* \cdots & p_{m,n}^* \end{bmatrix} \quad [III.14]$$

A partir esto, se define la Medida de Similitud como la distancia euclidiana entre el Objeto a clasificar y cada Patrón en la **TOP***, es decir:

$$?_{o,i} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (Obj_j^* - p_{i,j}^*)^2}}{Norma_{k,i}} \quad [III.15]$$

Donde, $?_{o,i}$ es la Medida de Similitud entre el Objeto a clasificar y los Patrones normalizados por $Norma_{k,i}$ [III.6], que es la Distancia Euclidiana entre los dos Patrones más cercanos entre sí y que son, en este caso, el Yacimiento Cristales y el sector Jatibonico Nuevo.

$$Norma_{k,i} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_{k,i}^* - p_{l,i}^*)^2} \quad [III.16]$$

Por lo que el resultado de la clasificación se interpretaría sobre la base de un múltiplo a partir de la cercanía entre estos dos Patrones.

III.2.2.8. Geometrización de los resultados.

Se parte de las zonas de **IRA** de la Línea y la posición de los **PS** destacados y sus valores de profundidades correspondientes.

Se procede a hacer una depuración de las profundidades de los **PS** correspondientes a un **IRA**. En este proceso no solo se tiene en cuenta los valores de la profundidad para cada **PS**, sino además la relación de distancia horizontal entre los **PS**. A partir del criterio Experto, esta depuración -construcción sigue el siguiente procedimiento:

1. Se ordenan los valores de profundidad y se toma el menor valor. A partir de aquí comienza el proceso de aceptación o eliminación de profundidades.
2. En el sentido creciente de las profundidades se van analizando los **PS**, los cuales deben cumplir con la condición lateral de estar dentro de un sector angular beta -establecido por el conocimiento del Experto- de 13 grados como máximo a partir del punto anterior. Este ángulo ha sido establecido por el Experto.

Como puede apreciarse en la Figura III.14, se toma el elemento uno por ser el menor valor de profundidad del ordenamiento inicial, después quedan aceptados los elementos 3 (por estar dentro del sector de 1), 4 (por estar dentro del sector de

1), 6 (dentro del sector de 4). El elemento 4 está dentro del sector de 2, pero este fue rechazado por el elemento 1. El análisis se realiza independiente a cada lado del **PS** de menor profundidad. Para el caso de la Figura III.14, quedan pues rechazados los valores de profundidad de los **PS** 2 y 5.

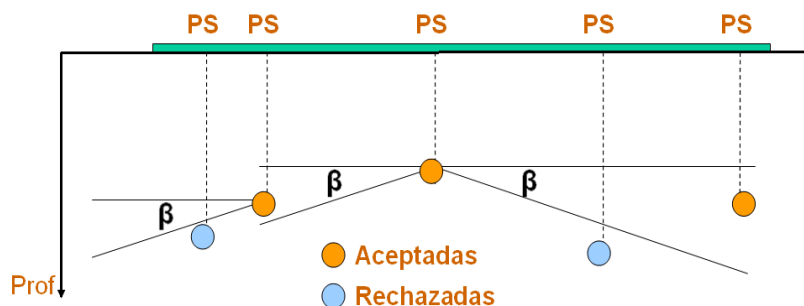


Figura III.14. Esquema del principio de depuración de las profundidades dentro de un Intervalo de Respuesta Anómala.

Depurados los valores de profundidad para un **IRA**, entonces se procede de la manera siguiente para geometrizar el modelo final:

- 1.- Se establece la posición de los límites del **IRA** dentro de los **PARA** contiguos.
 - ✍ Si hay dos **IRA** contiguos, el límite será el punto medio del **PARA** que los conecta.
 - ✍ Si el extremo del **IRA** coincide con el borde de la Línea, el límite del **IRA** queda abierto.
- 2.- Se une con líneas los valores resultantes de la depuración de profundidades en el **IRA** que se geometriza.
- 3.- Se analiza posteriormente cuál de los extremos de las profundidades enlazadas comienza a trazar el cierre de la sección, para esto, a partir del punto extremo de mayor valor de profundidad se traza una recta al límite del **IRA** más cercano con un ángulo de inclinación de 10 grados sexagesimales desde la horizontal.
- 4.- Si este límite es abierto, entonces la poligonal representa esta abertura bajando hasta una profundidad dada por la intercepción de este límite vertical y una línea que parte desde el punto anterior con un ángulo de inclinación de 15 grados (Figura III.15).

5.- Partiendo de este último punto, se traza una horizontal hasta el otro límite del **IRA** (este es el supuesto Contacto Agua-Petróleo).

6.- Si este otro límite es abierto, entonces el próximo punto (último) se proyectará horizontalmente con este otro límite vertical, de lo contrario, se cierra la poligonal.

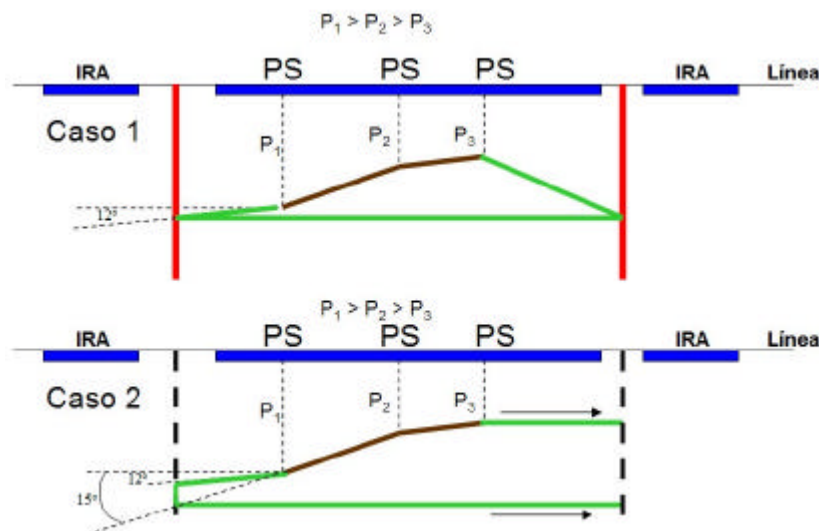


Figura III.15. Esquema del proceso de geometrización dentro del Intervalo de Respuesta Anómala.

En la Figura III.15 se muestran dos casos. En el Caso 1, la poligonal comienza a cerrarse por la izquierda (por ser este extremo de la poligonal el de mayor profundidad), además, ambos límites son cerrados. En el Caso 2 de la misma figura, esta poligonal se cierra por el mismo lado, pero los límites del **IRA** son ambos abiertos. Para este caso es necesario denotar de alguna forma estos límites abiertos del **IRA**. En el límite de la izquierda esta indicación se hace, localizando un punto más abajo, que sea la intersección de una recta con un ángulo de 15 grados desde la horizontal y a partir del punto anterior, y en el otro extremo (derecho) la proyección horizontal de los dos extremos de la poligonal en ese límite vertical.

III.2.2.9. Estimación Volumétrica del Modelo.

Después de tener geometrizado el modelo, podemos establecer para un **IRA**, la poligonal siguiente:

$$(X_1, Z_1) (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Z_n)$$

donde X_i es la posición del Punto Singular i -ésimo dentro de la Línea

Z_i es el valor de profundidad correspondiente al Punto Singular i -ésimo. A partir de esta poligonal podemos estimar el valor volumétrico de ese modelo. Para esto es necesario, a partir de la información Geomorfológica o, en su lugar, de la Susceptibilidad Magnética, proponer, reservadamente, un valor delta (δ) de la extensión horizontal del prospecto en las inmediaciones de cada Perfil para poder calcular el volumen (Figura III.16). La sección del prospecto la calcularemos a partir de la secuencia de coordenadas anteriores, aplicando el método del cálculo de las áreas hasta la superficie de cada uno de los segmentos de la poligonal (Figura III.17).

La expresión propuesta para su cálculo es la III.17. En ella se toman los puntos por pares consecutivos para calcular el área correspondiente desde ese segmento hasta la superficie de la Línea. Cada segmento tendrá un signo, referente al sentido horario o antihorario en que es calculada el área.

$$A_s = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(x_{i+1} - x_i)(z_{i+1} - z_i)}{2} \quad \text{[III.17]}$$

Y para determinar el volumen del prospecto se efectúa la operación:

$$Vol_{prosp} = A_s \cdot \delta \quad \text{[III.18]}$$

donde δ es valor de la extensión horizontal del prospecto en las inmediaciones de cada Perfil.

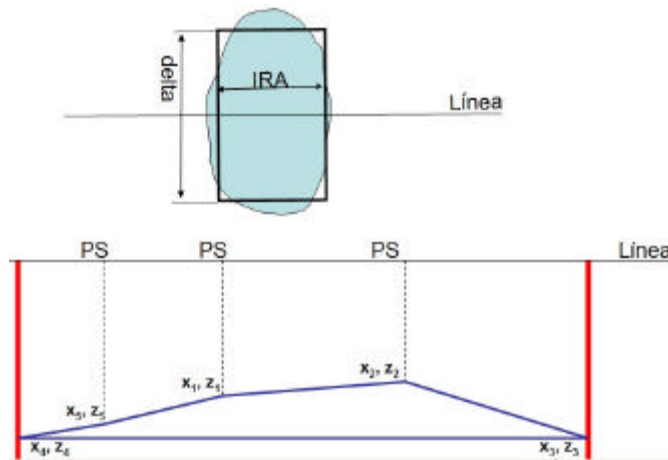


Figura III.16. Distribución de la secuencia de coordenadas de la poligonal.

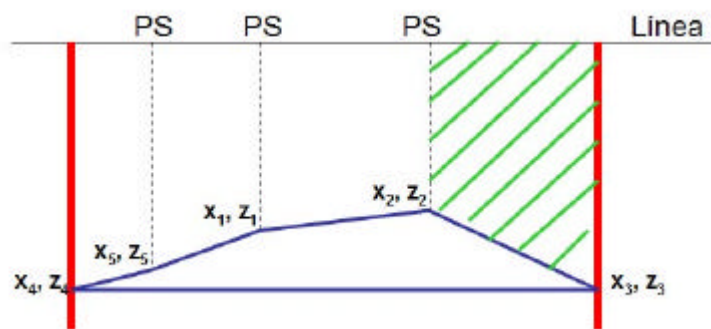


Figura III.17. Señalización de uno de los sectores al cual se le calcula el área.

III.2.3. Validación del Modelaje.

En primer lugar, validar el modelo incluye tanto la verificación como la validación propiamente dicha. En cuanto a la verificación, la misma supone una validación formal, o sea, si la especificación del conocimiento es sintácticamente correcta y consistente, esto es, no faltan componentes o sobran, por ejemplo, inferencias que no se utilizan en ninguna tarea.

Para la validación en cuanto a la comprobación de que el modelo contiene todo el conocimiento necesario, lo más práctico es una simulación, bien sobre el papel, bien sobre un soporte software. En este último caso, se llevaría a cabo la simulación sobre un entorno software al que se lleva el modelo y se convierte en computable, como prototipo, desde luego de forma rápida, sin que requiera gran cantidad de tiempo y esfuerzo.

Esto fue realizado en un ambiente de Microsoft Excel, el cual facilitaba la reducción de tiempo y esfuerzo en la simulación de la validación del modelo y era propicio por la facilidad con que puede asimilar nuevos ajustes en el perfeccionamiento del modelo a la realidad.

La determinación del Nivel de fondo de los atributos fue simulado dentro del ambiente del propio **Sistema Redox** [Rodríguez, O. (2005)].

Con respecto al proceso de interpretación de las líneas se diseñó la secuencia de pasos en hojas de Microsoft Excel. Estas hojas en orden consecutivos ofrecían metodológicamente el orden lógico del procesamiento.

Se trabajó para la simulación tanto en la programación a nivel de celdas vinculadas dinámicamente como la del diseño de macros, es este último caso, cuando el nivel de complejidad era mayor.

Finalmente, la validación del modelaje matemático se presenta aplicada a un caso geológico complejo, que es el del Yacimiento Cristales [Variados documentos, Archivo Técnico EPEP Majagua (1960-2000)]. Este yacimiento está ubicado en el Municipio de Majagua, provincia de Ciego de Ávila, limitado por las coordenadas Lambert y: 2397000 a 239000 y x: 709000 a 711000. El mismo posee una estructura monoclinallada con un hundimiento general hacia el Norte de las rocas que constituyen el Complejo Vulcanógeno Sedimentario. Esta constituido por tres bloques principales Sur, Central y Norte, separados por fallas de dirección SO-NE, que a su vez son cortadas por otras de dirección NO-SE. En el yacimiento se han detectado varios horizontes productores. La producción principal proviene de las rocas vulcanógeno sedimentarias, no siendo ésta uniforme, debido a los cambios faciales característico de este tipo de roca. La profundidad media de los reservorios en el yacimiento oscila entre los 800 y 1600 m. Los colectores son poroso-intergranular e intergranular-fracturado con porosidad entre 5 y 15% (promedio 12%), con una porosidad efectiva entre 5 y 7%, un espesor efectivo variable entre 40 y 100 m y una permeabilidad media de 100 md. El petróleo es ligero y casi no presenta azufre, variando desde 19.3 hasta 26.7° API (promedio 22° API). Los primeros cinco pozos del yacimiento cristales fueron perforados por CAMDECO en los años 1956-57, basados en un alto estructural detectado por la prospección sísmica, siendo productores de petróleo y gas solo dos pozos en las rocas denominadas como Calizas Cristales. En el año 1960 y posterior se encontró producción más al Sur en las rocas vulcanógeno sedimentarias. En los años 1965-66 se hicieron trabajos detallados de balanza de torsión para encontrar zonas de fallas y perforar próximo a las mismas en lugares estructuralmente elevados. Así se descubrieron las dos mayores zonas de acumulación de petróleo y gas dentro del yacimiento, también, en las rocas vulcanógeno sedimentarias.

Para la validación, se empleó una Línea de 3400 m de longitud, con paso de observación 200 m y orientación SE -NO, la cual atraviesa completamente el yacimiento. En general, se diseñaron 10 hojas Excel, ellas son:

1. Hoja para el almacenamiento de los datos (**BaseDatos**).
2. Hoja para la selección de los datos (**SeleDatos**).
3. Hoja para la estimación de los **IRAA**, los **IRA**, los **PS** y los **PARA** de la Línea (**PS_IRAA_IRA_PARA**).
4. Hoja para la selección de los pares de las dependencias (**DatosDependAtrib**).
5. Hoja para la resolución de las dependencias (**Dependencias**).
6. Hoja para el cálculo y depuración de las profundidades (**Profundidades**).
7. Hoja para la clasificación del objetivo a partir de los patrones (**Clasificación**).
8. Hoja para la graficación del modelo propuesto (**Geometrización**).
9. Hoja para la estimación del volumen del Prospecto (**CálculoVolumétrico**).
10. Hoja auxiliar para variables globales de trabajo (**Definiciones**).

A continuación haremos una breve explicación de cada una de las hojas diseñadas para simular el proceso de interpretación de una Línea del **Complejo Redox**:

1. Hoja para el almacenamiento de los datos (**BaseDatos**).

En esta primera hoja (Figura III.18), la cual es pasiva, se encuentran ordenados en una Tabla de Objetos/Propiedades la información necesaria de cada una de las líneas procedentes de la Base de Datos Redox.

A		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1		BASE DE DATOS																		
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9		Objetivo	Sector-Línea	Estacas	Kn	Ur	REr	EQ 1	EQ 2	K	U	RE	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4
10		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	0	2.62	8.40	0.00	2.13	1.05	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
11		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	30	3.33	-12.60	-1.76	2.08	1.20	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
12		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	60	2.82	0.40	-13.03	4.73	2.52	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
13		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	80	1.63	-7.60	0.31	2.18	1.24	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
14		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	100	1.63	-10.80	-4.01	1.19	2.02	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
15		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	120	1.63	0.40	-20.82	5.82	2.45	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
16		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	140	1.35	-9.60	-18.03	4.52	2.49	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
17		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	160	1.15	-4.60	-12.71	3.12	2.64	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
18		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	180	2.30	-6.80	-19.29	6.08	3.18	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
19		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	200	0.95	-19.60	-17.74	4.57	2.06	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
20		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	220	1.75	-18.80	-17.83	4.83	3.81	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
21		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	240	1.87	-6.60	-19.42	5.25	3.15	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
22		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	260	1.47	-19.60	-17.22	4.94	3.03	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
23		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	280	0.79	-4.60	-0.74	1.77	2.41	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
24		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	300	2.46	-24.60	0.44	0.73	0.82	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
25		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	320	1.98	-26.60	-1.23	1.25	1.44	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
26		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	340	0.75	-12.80	-1.55	1.09	1.13	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
27		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	360	3.25	-14.60	-8.17	1.61	2.33	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
28		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	380	2.10	-9.60	-2.01	0.99	1.01	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
29		Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	400	2.46	-10.60	-15.18	3.84	2.56	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
30		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	0	2.96	-16.70	0.10	0.68	0.76	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
31		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	20	1.62	-13.70	-3.71	1.24	1.28	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
32		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	40	3.90	0.30	-5.62	2.00	1.91	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
33		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	60	1.48	1.30	-1.72	1.18	1.51	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
34		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	80	1.55	-13.70	1.28	1.13	1.16	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
35		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	100	10.14	-16.70	-2.03	1.21	1.25	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
36		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	120	3.00	-16.70	8.69	2.50	0.59	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
37		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	140	1.55	-16.70	-1.37	1.24	1.61	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
38		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	160	1.84	-4.70	-8.19	1.61	1.98	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
39		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	180	0.76	24.30	-5.41	1.61	1.84	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
40		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	200	0.83	-16.70	-4.44	1.47	1.32	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
41		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	220	1.41	28.30	-5.63	1.68	1.89	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
42		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	240	2.17	-1.70	-3.17	1.68	2.20	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
43		Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	260	1.91	-14.70	-1.87	1.97	1.84	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		

Figura III.18. Hoja Excel para el almacenamiento de los datos (BaseDatos).

Los datos se encuentran de forma consecutiva y están referenciados con el encabezamiento correspondiente a cada columna. Los datos aparecen de la siguiente manera respecto a las columnas:

Columna A: Objetivo	Columna K: Fondo_RE _r
Columna B: Sector-Líneas	Columna L: Fondo_EQ_1
Columna C: Estacas	Columna M: Fondo_EQ_2
Columna D: K _n	Columna N: Fondo_EQ_3
Columna E: U _r	Columna O: Fondo_EQ_4
Columna F: RE _r	Columna P: SIMBOLO_EQ_1
Columna G: EQ_1	Columna Q: SIMBOLO_EQ_2
Columna H: EQ_2	Columna R: SIMBOLO_EQ_3
Columna I: Fondo_K _n	Columna S: SIMBOLO_EQ_4
Columna J: Fondo_U _r	

2. Hoja para la selección de los datos (**SeleDatos**).

En esta hoja se realiza (Figura III.19), primero la selección dinámica de la Línea con que se desea trabajar y posteriormente se comprueba visualmente los datos que contiene la Línea Objeto. Esto se hace colocando una “x” en una de las celdas de la columna O desde la fila 9 hasta la 12.

3. Hoja para la estimación de los **IRAA**, **IRA**, los **PS** y los **PARA** de la Línea (**PS_IRAA_IRA_PARA**).

Esta es una hoja dinámica de cálculos múltiples (Figura III.20), es decir en ella se obtienen los **PS** de la Línea, **IRAA**, el **IRA** y los **PARA**. Además algunos cálculos como son el valor medio de los valores del atributo para las estaciones del **IRA** y otros elementos informativos.

4. Hoja para la selección de los pares de las dependencias (**DatosDependAtrib**).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Selección de datos															
2	OBJETIVOS		HIDROCARBURO		EQ_1=		EQ_2=		EQ_3=		EQ_4=		Fondo		Dist. Estacas[m]= 200	
3	Petróleo	x			Pesado				Ni	V			22.25			
4	Minerales				Pesado-Ligero	x							31.75			
5	Medio Ambiente				Ligero											
6																
7	Estacas		Atributos		Fondo		Fondo		Fondo		Fondo		Fondo		Fondo	
8	Kn	Ur	REr	Ni	V	K	U	RE	Ni	V						
9																
10	0	1.05	0.75	-5.96	0.81	1.04	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
11	20	3.78	-10.25	-11.04	1.44	2.08	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
12	40	1.99	-9.25	-5.34	1.75	1.95	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
13	60	2.92	-5.25	-12.74	4.72	4.41	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
14	80	9.37	7.75	-13.25	3.55	2.96	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
15	100	3.59	-11.25	0.30	1.26	1.26	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
16	120	1.58	-17.25	10.34	1.12	1.07	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
17	140	4.88	-3.25	-0.86	3.28	2.39	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
18	160	2.25	24.75	-11.11	2.34	2.30	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
19	180	0.61	-27.25	10.43	0.94	0.85	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
20	200	0.76	-45.25	1.09	1.48	1.57	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
21	220	2.45	-30.25	-5.26	2.20	1.76	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
22	240	2.80	-16.25	-4.62	3.01	1.98	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
23	260	2.15	-38.25	-0.52	1.17	1.07	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
24	280	1.64	-14.25	-9.73	1.12	1.04	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
25	310	2.44	-9.25	-10.87	1.93	1.35	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
26	340	3.49	-15.25	-11.18	1.75	1.64	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75					
27																
28																
29																
30																
31																
32																
33																
34																
35																

Figura III.19. Hoja Excel para la selección de los datos (SeleDatos).

Ciego de Avila-Yacimiento Cristales																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ</

Figura III.20. Hoja Excel para la estimación de los IRAA, IRA y los PS de la Línea (**PS_IRAA_IRA_PARA**).

Esta hoja dinámica (Figura III.21), prepara los datos que serán llevados a establecer la dependencia de los elementos químicos con los restantes atributos.

5. Hoja para la resolución de las dependencias (**Dependencias**).

Esta es una hoja dinámica (Figura III.22) y que posee también una macro asociada con la imagen superior (se activa haciendo clic en la imagen), pues el algoritmo de agrupaciones propuesto es de tal complejidad que el trabajo con la programación de las celdas queda por debajo de las posibilidades. Además de los cálculos se ofrece los gráficos de las dependencias para hasta tres horizontes (hasta tres rectas), se calculan además los valores de a_i y b_i que se necesitan para el cálculo posteriormente de las profundidades. Todos los puntos traídos de la hoja anterior a ésta son Puntos Singulares.

6. Hoja para el cálculo y depuración de las profundidades (**Profundidades**).

En esta hoja dinámica (Figura III.23) y también con macro (asociado a la imagen superior izquierda) se calculan las profundidades para todos los **PS** de los cuatro atributos a partir de los parámetros traídos de otras hojas de cálculo, estos son a_i , b_i , el valor del atributo, el valor del Fondo y otros elementos informativos. Después de esto, se realiza la depuración de las profundidades de todos los atributos para cada estación, ofreciendo la macro diseñada el valor de la profundidad, y los errores (en \pm metros y el por ciento que representa).

7. Hoja para la clasificación del objetivo a partir de los patrones (**Clasificación**).

Esta hoja preparada solamente de forma dinámica (Figura III.24), efectúa la clasificación de la Línea con los Patrones elaborados.

8. Hoja para la graficación del modelo propuesto (**Geometrización**).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1	Datos para las Dependencias entre Atributos																					
2																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8	Estacas	PS	Ni	Kn	PS	Ni	RER	PS	Ni	Ur												
9																						
10	0																					
11	20	3	1.44	3.78	3	1.44	-11.04	3	1.44	-10.25												
12	40																					
13	60	1	4.72	2.92	1	4.72	-12.74	1	4.72	-5.25												
14	80	2	3.55	9.37	2	3.55	-13.25	2	3.55	7.75												
15	100																					
16	120																					
17	140	2	3.28	4.88	2	3.28	-0.86	2	3.28	-3.25												
18	160				1	2.34	-11.11															
19	180																					
20	200																					
21	220				1	2.20	-5.26															
22	240	2	3.01	2.8	2	3.01	-4.62	2	3.01	-16.25												
23	260							1	1.17	-38.25												
24	280																					
25	310	1	1.93	2.44	1	1.93	-10.87	1	1.93	-9.25												
26	340	3	1.75	3.49	3	1.75	-11.18	3	1.75	-15.25												
27																						
28																						
29																						
30																						
31																						
32																						
33																						
34																						
35																						
36																						

Figura III.21. Hoja Excel para la selección de los pares de las dependencias (DatosDependAtrib).

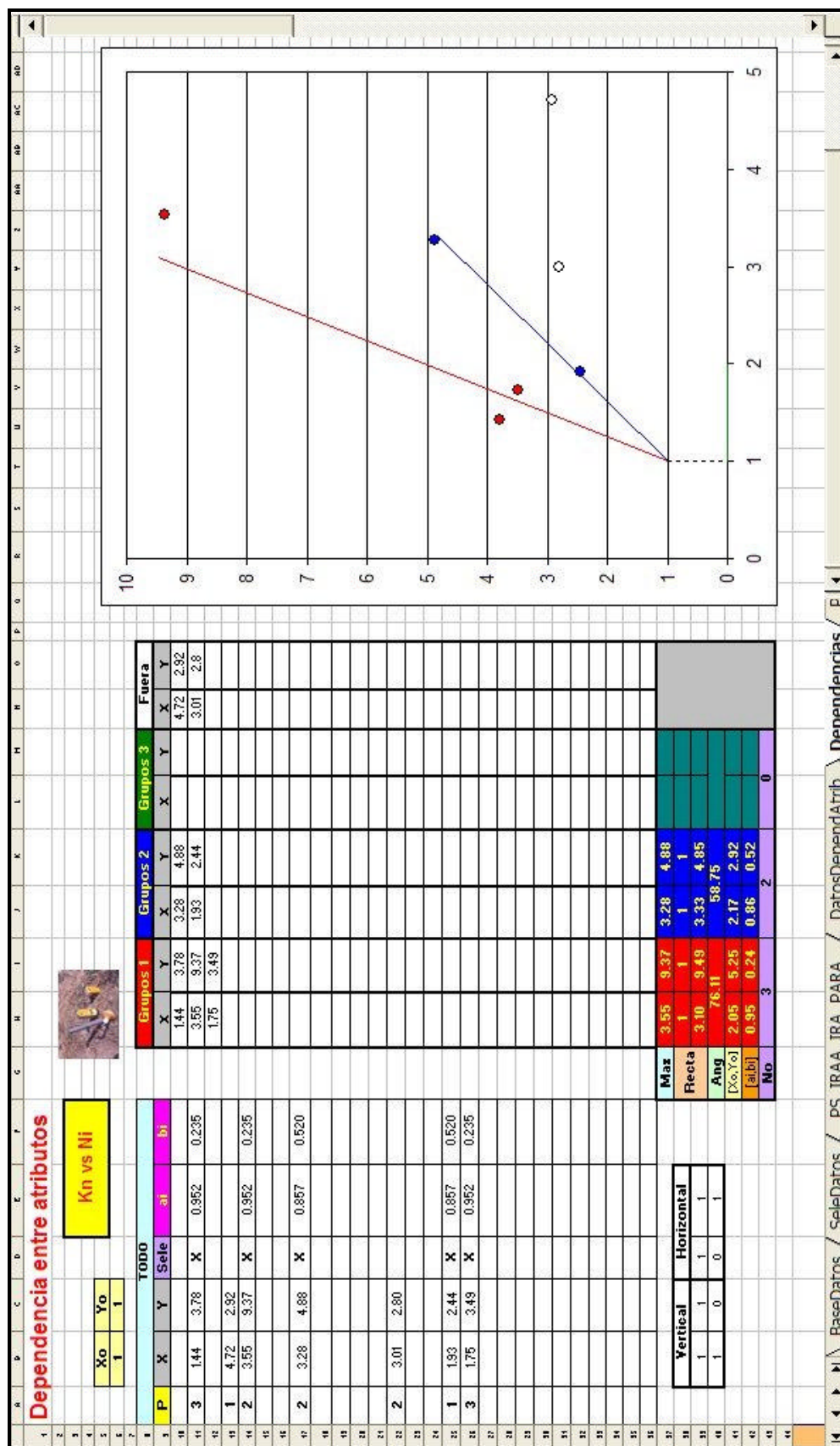


Figura III.22. Hoja Excel para la resolución de las dependencias (**Dependencias**).

[illegible]

Figura III.23. Hoja Excel para el cálculo y depuración de las profundidades (**Profundidades**).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P		
1	Clasificación																	
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7		Selección		x		x		x	x	x	x	x	x	x				
8		Atributos	Kn	VM	F	Ur	VM	F	REr	VM	F	Ni	VM	F	Fe	Zn	V	Similitud
9	F																	
10	Yacimiento Cristales		0.69	3.24	195.30	-18.03	17.99	-9.20	22.30	2.60	0.94	33.25	31.75					
11	Jatibonico Oeste		0.22	2.52	271.70	-42.55	12.22	-3.96	43.00	1.77	1.81	85.50	55.80					
12	Jatibonico Nuevo	0.25	2.22	189.60	-12.90	32.59	-11.9	19.3	3.67	0.90	52.00	25.75						
13	Yacimiento Jatibonico	0.28	2.92	215.70	-13.10	13.91	-3.73	38	1.82	1.30	45.00	42.33						
14																		
15																		
16																		
17																		
18		Objeto	0.69	3.24	195.25	-18.04	17.99	-9.19	22.25	2.60	31.75							
19																		
20																		
21																		
22		Clasificación	Yacimiento Cristales													30.81		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		

Figura III.24. Hoja Excel para la clasificación del objetivo a partir de los patrones (Clasificación).

Esta hoja programada dinámicamente (Figura III.25) y con la macro asociada a la imagen superior izquierda, gráfica la información de las columnas de la A hasta la D. Se obtiene así la sección del modelo que representará al prospecto que se estudia. Aparecen otros datos informativos como el nombre de la Línea y la clasificación de la hoja anterior.

9. Hoja para la estimación del volumen del Prospecto (**Cálculo Volumétrico**).

Para la estimación volumétrica se preparó esta hoja (Figura III.26) de forma dinámica. La magnitud del volumen es entregada en millones de m³.

10. Hoja auxiliar para variables globales de trabajo (**Definiciones**).

Esta última hoja Excel (Figura III.27) es solo de datos globales y apoya todo el proceso de interpretación de la Línea.

La correspondencia entre los resultados del modelo con los datos geológicos reales ofrecidos al inicio del epígrafe es buena: Se reconoce una estructura de reservorios escalonados que se hundan progresivamente hacia el Norte, destacándose cuatro bloques (los tres primeros , conocidos, con profundidades entre 984 y 1630 m, y el último, propuesto, con profundidad de 2318 m). La calidad estimada del hidrocarburo según el Grado Redox (Equivalente Inorgánico del Grado API), es de 22.8°. De esta manera , fue validado el modelaje realizado para la interpretación de la Línea del **Complejo Redox**, donde no solo se corroboró la coincidencia de los resultados del modelo con la realidad geológica y el Criterio Experto, sino que se confirmó, además, la variante propuesta de otro posible bloque más al Norte en el yacimiento .

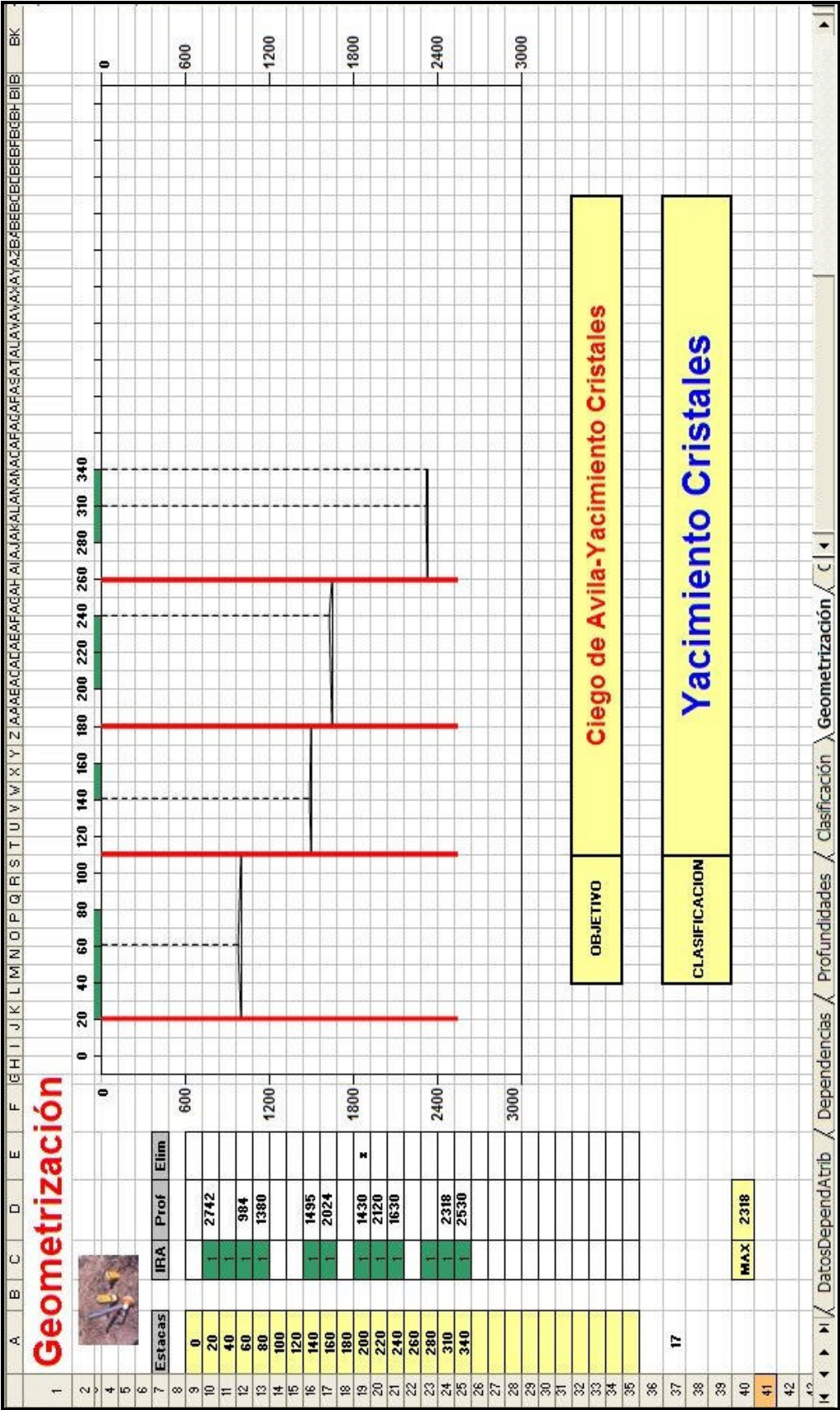


Figura III.25. Hoja Excel para la graficación del modelo propuesto (Geometrización).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Cálculo Volumétrico															
2																
3																
4																
5																
6		4878		2846		6504		5962		0		0		0		
7		250		250		251		252		0		0		0		
8		1219525		711375		1632554		1502474		0		0		0		
9		X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	
10		600	984	1400	1495	2400	1630	3100	2318							
11		1100	995	1800	1503	2600	1646	3400	2318							
12		200	995	1100	1503	1800	1646	3400	2329							
13		600	984	1400	1495	2400	1630	2600	2329							
14								3100	2318							
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27	-1	-494710	-1	-599626	-1	-327626	-1	-695400								
28	1	895356	1	1052191	1	1317008										
29	-1	-395768	-1	-449720	-1	-982878	1	1863072								
30							-1	-1161710								
31																

Figura III.26. Hoja Excel para la estimación del volumen del Prospecto (Cálculo Volumétrico).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Atributos		Min	Max	Interv	Peso	Peso [fracc]			Prioridad de los EQ			
1										1	Ni		
2	Kappa Normalizada	Kn	0.5	12	0.5	24	0.240			2	V		
3	Potencial Redox Reducido	Ur	-75.5	90	15	24	0.240			3	Fe		
4	Reflectancia Espectral Reducida	Rer	-20.1	10	1	20	0.200			4	Zn		
5	Elemento Químico	Cn	0.5	7.5	0.5	32	0.320			5	Pb		
6						100				6	Co		
7										7	SEQ		
8													
9													
10													
11	Atributos												
12	Kappa Normalizada	Kn	>= 1.45										
13	Potencial Redox Reducido	Ur	< 0										
14	Reflectancia Espectral Reducida	Rer	<= .1										
15	Elemento Químico	Cn	>= 1.45										
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
32													

Figura III.27. Hoja Excel auxiliar para variables globales de trabajo (Definiciones).

IV. LA ***TECNOLOGIA REDOX*** APLICADA A LA EXPLORACION PETROLERA EN CUENCA CENTRAL

IV. LA TECNOLOGIA REDOX APLICADA A LA EXPLORACION PETROLERA EN CUENCA CENTRAL

IV.1. Introducción.

La historia y desarrollo gaso -petrolífero de la Cuenca Central , según [Hidalgo, H., Varona, M. et al. (1989)], es la historia del empleo de diferentes criterios geológicos de búsqueda (directos, estructurales, estratigráficos, tectónicos, etc.), complementados con un complejo convencional de geofísica de prospección (gravimetría y sísmica), los cuales han tenido éxitos muy parciales. Aún no se cuenta con un conjunto de criterios efectivos que expliquen, de manera integral, los mecanismos que determinaron la migración y posterior entrapamiento de los hidrocarburos en las diferentes áreas de la Cuenca Central. Para ejemplificar esto, baste señalar que en los últimos 55 años solo se han revelado como yacimientos, el área Cristales (mediano), Jatibonico (pequeño) y Pina (pequeño), además de otras áreas con muy limitadas producciones como son Reforma, Catalina, Guayacanes, Mamonal y Brujo . Esto hace que se mantengan y complejicen las investigaciones en esta región, pues, en buena lógica, no es comprensible que en un área tan extensa solo se localicen tres yacimientos de importancia industrial. En esta dirección de trabajo ha tenido lugar: la incorporación dentro del complejo convencional de exploración de la aeromagnetometría; el uso de la tecnología más avanzada de campo y procesamiento en la sísmica de reflexión 2D y; el empleo de la geomorfología. Es solo a partir del año 2002, que comienzan a utilizarse sistemáticamente, con carácter complementario, las técnicas geofísico - geoquímicas no convencionales de exploración como el **Complejo Redox**. Con el interés del Centro de Investigaciones del Petróleo y con la colaboración de la dirección técnica de la EPEP Majagua, se contrataron los servicios del IGP para evaluar, mediante la **Tecnología Redox**, la Aerogammaespectrometría y la Geomorfología un prospecto petrolífero en la región de Ceballos y Cacahual, provincia de Ciego de Ávila.

En el presente capítulo se exponen los resultados de estas investigaciones, complementados con la reinterpretación del complejo convencional de exploración (gravimetría, aeromagnetometría y sísmica de reflexión 2D). La tarea planteada consiste en la cartografía de la posible ocurrencia, estableciendo criterios sobre su tipo estructural, profundidad y naturaleza del hidrocarburo aplicando la Modelación Matemática expuesta en el capítulo anterior.

IV.2. Sector Ceballos.

El centro del sector Ceballos se encuentra ubicado a 3.5 km al SO del poblado Ciro Redondo (Pina) en la hoja cartográfica Ceballos (4481 -I), provincia de Ciego de Ávila (Fig. IV.1). El área, la cual abarca a ambos lados de la carretera que une las ciudades de Ciego de Ávila y Morón, pasando por el poblado referido, se caracteriza por el cultivo de la caña de azúcar y cítricos; la misma tiene accesos aceptables a través de caminos cañeros y citrícolas.

El Grado de Estudio del sector Ceballos, según [Hidalgo, H., Varona, M. et al. (1989)], puede separarse en dos etapas:

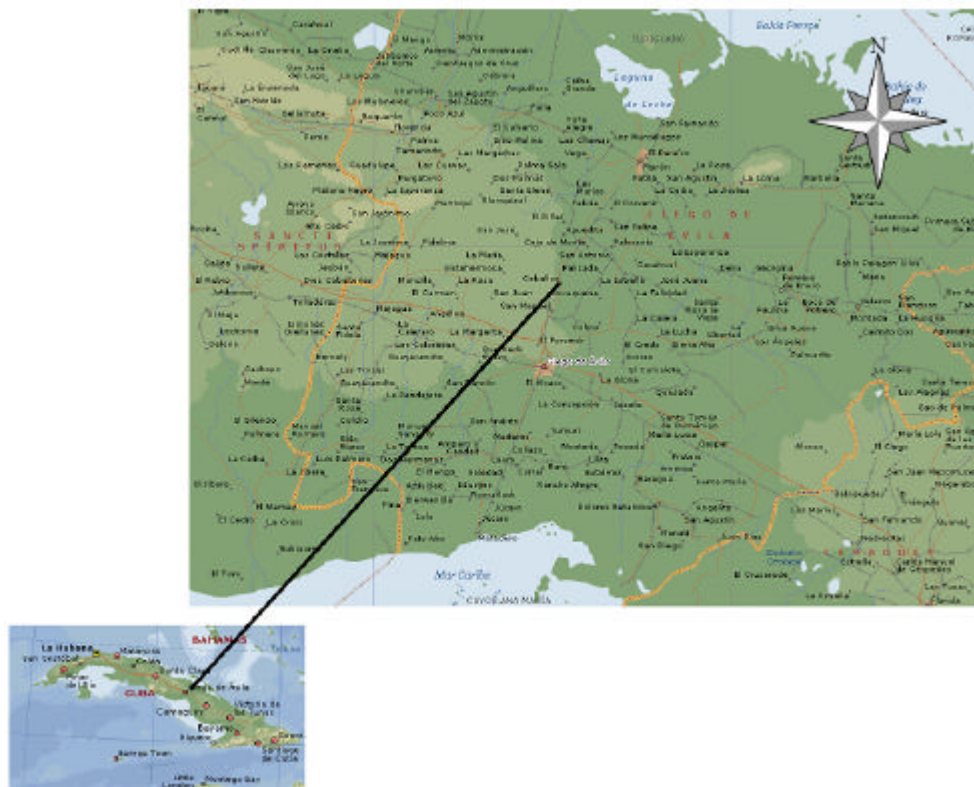


Figura IV.1. Ubicación geográfica del Sector Ceballos.

La primera etapa comprende las décadas de los 60 -70 y se caracteriza por el uso de la gravimetría residual, los estudios gravimétricos mediante balanza de torsión y la sísmica de refracción (Perfil 78). A partir de estos estudios fueron ubicados los pozos Ceballos 1 y 3, estando localizado el primero dentro del actual sector de estudio. El pozo Ceballos 1 tiene 1449 m de profundidad y presentó manifestaciones de hidrocarburo aproximadamente a los 1000 m, con resultados positivos en el ensayo. Su posición exacta con respecto a una falla regional, detectada por balanza de torsión y, de acuerdo a la interpretación del perfil de refracción (Perfil 78), coincide con su borde Sur, donde el horizonte refractor comienza a levantar en esa dirección. Dentro del actual sector de los trabajos, la sísmica de refracción exhibe un bloque hundido con una frontera refractora, insegura, a más de 2000 m de profundidad.

La segunda etapa comprende las décadas de los 80 y 90 y se caracteriza por el uso de la gravimetría residual, buscando máximos indicativos del levantamiento del tope de las tobas, y la sísmica de reflexión 2D (la aeromagnetometría se usó en mucho menor grado). El papel predominante dentro de este complejo lo jugó la sísmica de reflexión 2D, con tres perfiles en el sector de los trabajos (realizados por la Compañía Premier e interpretados por DIGICUPET) partir de los cuales fue revelado un interesante levantamiento estructural de rumbo sublongitudinal (Fig. IV.2).

Como escenario aerogeofísico convencional se empleó, para el análisis e interpretación de los datos, una Reducción al Polo del levantamiento aeromagnético del sector. La fuente de los datos aerogammaespectrométricos y aeromagnéticos utilizada en este trabajo [Liubi, L. I., Martinova, T. V. et al. (1984)] considera líneas de vuelo con distancia de 500 m y altura de vuelo 70 m.

Como las mediciones se realizaron en más de un perfil, solo el 30 -50% del total de las muestras tomadas de los puntos de observación se sometieron al Análisis Químico de elementos metálicos. En la Pedogeoquímica se utilizaron digestiones convencionales y la Espectroscopia con ICP más el Análisis por Absorción Atómica, como método de control. Los análisis químicos fueron realizados en el Laboratorio Central de Minerales J. I. del Corral y en el CEINPET.

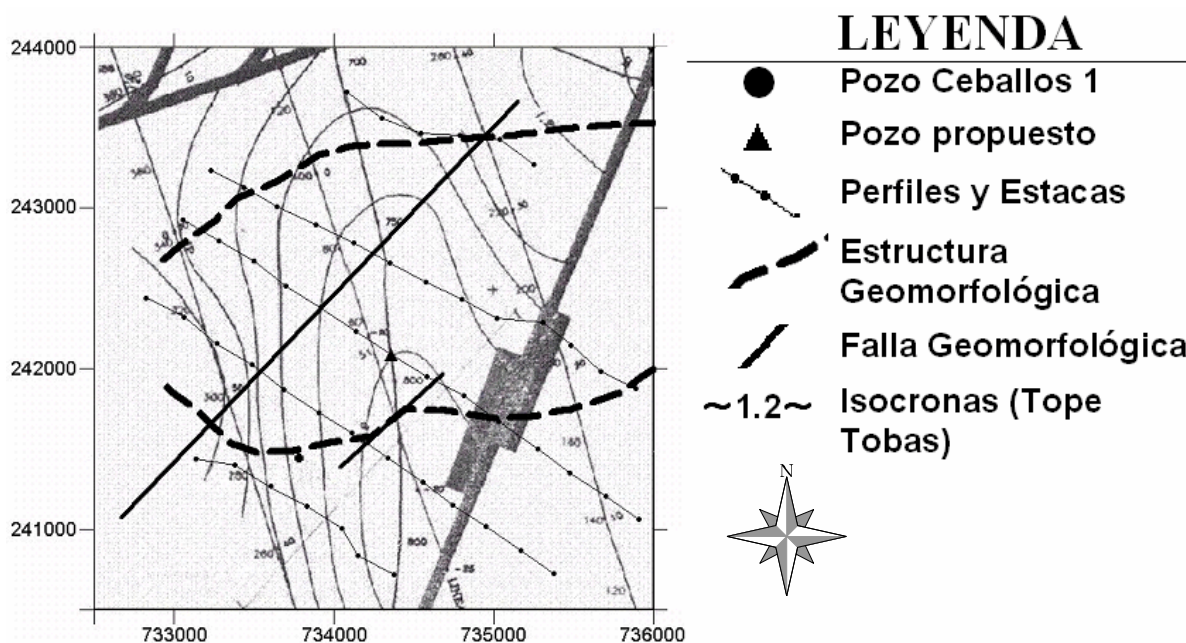


Figura IV.2. Escenario Estructural de la Sísmica de Reflexión 2D del sector de los trabajos.

Los datos de campo del **Complejo Redox** fueron procesados con el **Sistema Redox** [Rodríguez, O. (2005)], sistema capaz de almacenar recuperar y elaborar primariamente los datos y efectuar la interpretación de los perfiles del **Complejo Redox**.

Sobre la Geomorfología tenemos que el material utilizado para el análisis morfométrico estuvo integrado por las hojas topográficas del ICGC a escala 1:10 000 del sector de los trabajos. El procesamiento consistió en una separación regional-residual manual a partir de las curvas de nivel, con el fin de identificar y cartografiar una morfoestructura positiva manifestada en el área.

Sobre los resultados del sector Ceballos tenemos que el Escenario satelital, cuya fuente es una imagen Landsat TM, revela una anomalía tonal negativa (propia de hidrocarburos con naturaleza pesada) de contornos irregulares, elongados en la dirección NE, y dimensiones aproximadas de 0.95 x 1.1 km, ubicada sobre la parte centro-occidental del sector de los trabajos (Fig. IV.3). En su centro exhibe una pequeña anomalía positiva la cual puede atribuirse a un escape gaseoso. Con fines comparativos, en la misma figura, se exhibe el contorno de la morfoestructura positiva revelada, los perfiles de medición y la posición del pozo Ceballos 1.

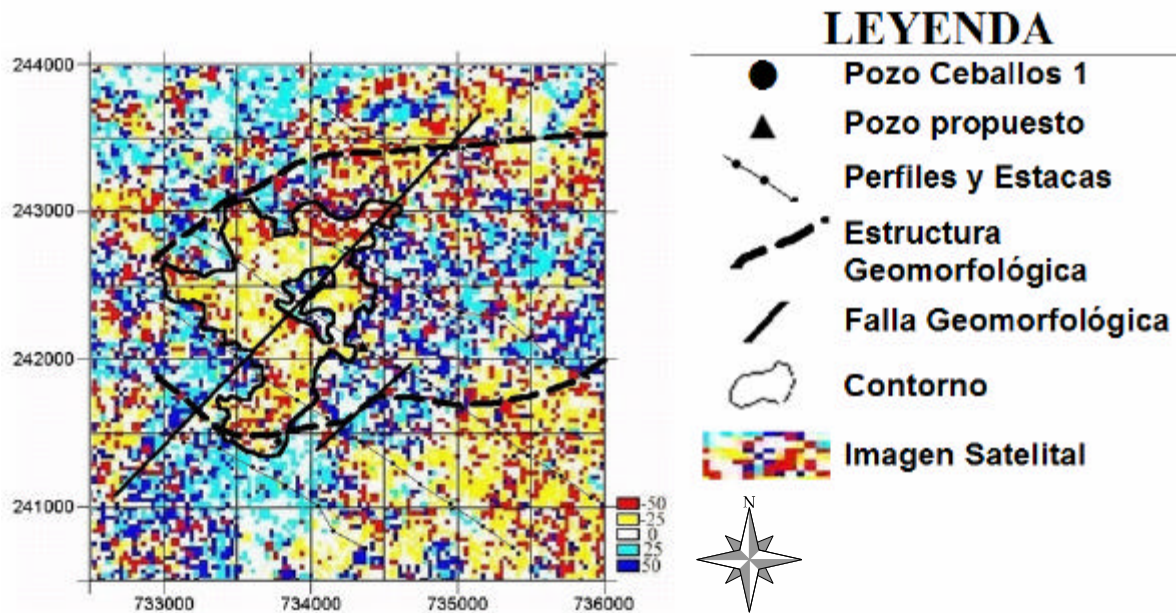


Figura IV.3. Escenario Satelital del sector Ceballos.

La morfoestructura encierra, en su porción occidental, a la anomalía satelital la cual es atravesada por su centro por una falla NE, sugiriendo que esta pudo constituir la vía para la migración del hidrocarburo entrampado. El pozo Ceballos 1, por su parte, se localiza en el extremo meridional de la anomalía satelital y fuera del límite Sur de la morfoestructura, sugiriendo una posible mayor perspectiva gaso-petrolífera hacia el interior del sector de los trabajos.

Sobre el escenario Aerogammaespectrométrico, se tiene que en la Fig. IV.4. un cuadro anómalo en el que se destaca, en el límite Norte del sector, un amplio mínimo de dirección latitudinal y dimensiones 4.8x1.2 km, cuya naturaleza, a juzgar por sus características espaciales y de contorno, parece ser litológica (probablemente, suelos ferruginosos). También, con fines comparativos, en la misma figura, se exhibe el contorno de la morfoestructura positiva revelada, los perfiles de medición y la posición del pozo Ceballos 1. Como puede observarse en la figura, el límite Sur de la morfoestructura coincide con un notable escalón del campo AGE.

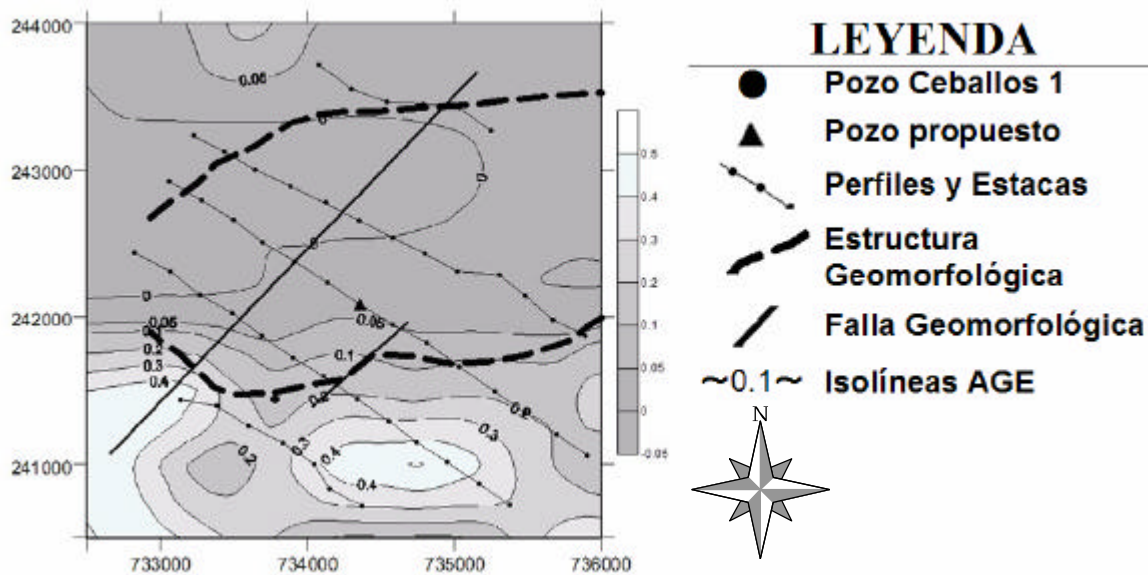


Figura IV.4. Escenario AGE del sector Ceballos.

Sobre la geomorfología, el área se identifica por una morfoestructura positiva de dirección sublatitudinal ($Az=80^\circ$) y dimensiones 3.6×1.65 km, cuyos límites Sur y Norte coinciden con cañadas, las cuales parecen ser el reflejo de fallas regionales (Fig. IV.5). El límite Sur coincide con un escalón gravimétrico, aeromagnético y aerogammaespectrométrico, revelando una falla detectada mediante balanza de torsión en la década de los 60, la cual fue referida como la posible continuación de la Falla Cristales. Al propio tiempo, la morfoestructura es atravesada en su porción occidental por una falla de rumbo NE ($Az=45^\circ$), la cual intercepta, por su centro, a la anomalía satelital indicadora de la presencia de hidrocarburos. Por el carácter práctico-informativo que representa esta morfoestructura, en su papel de reflejo de la posible trampa estructural, ésta, al igual que los perfiles de medición y la posición del pozo Ceballos 1, se representan en todas las figuras para fines comparativos.

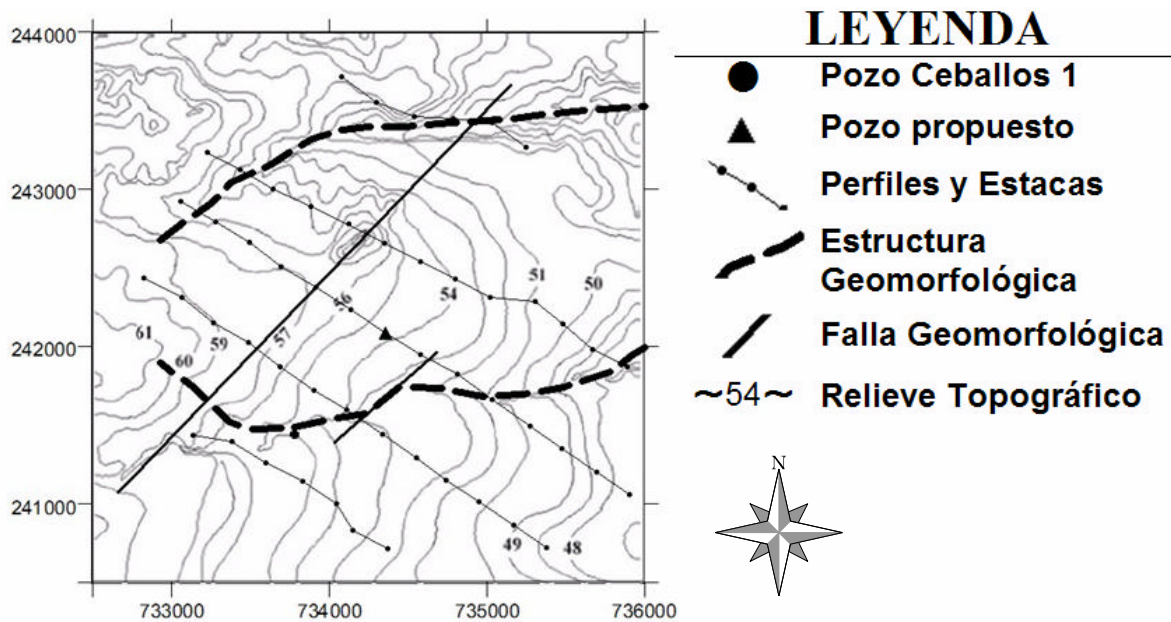


Figura IV.5. Interpretación geomorfológica del sector Ceballos.

Sobre el **Complejo Redox**, los perfiles de medición (Fig. IV.6) se eligieron de manera tal que la Línea Central (2T) interceptara transversalmente la parte más elevada de la estructura revelada por la sísmica y la geomorfología, de modo que las dos restantes líneas largas (3.0 km), quedaron aproximadamente distribuidas de forma homogénea sobre la estructura (y morfoestructura), mientras que las dos más cortas (1.5 km) y distantes tenían el propósito de mostrar la terminación del campo anómalo asociado con el presunto reservorio.

Los valores del Perfil 2T para cada uno de los atributos se muestran en la Tabla IV.1 y en la Tabla IV.2, los valores correspondiente al mismo perfil pero de los valores de contenido de metales.

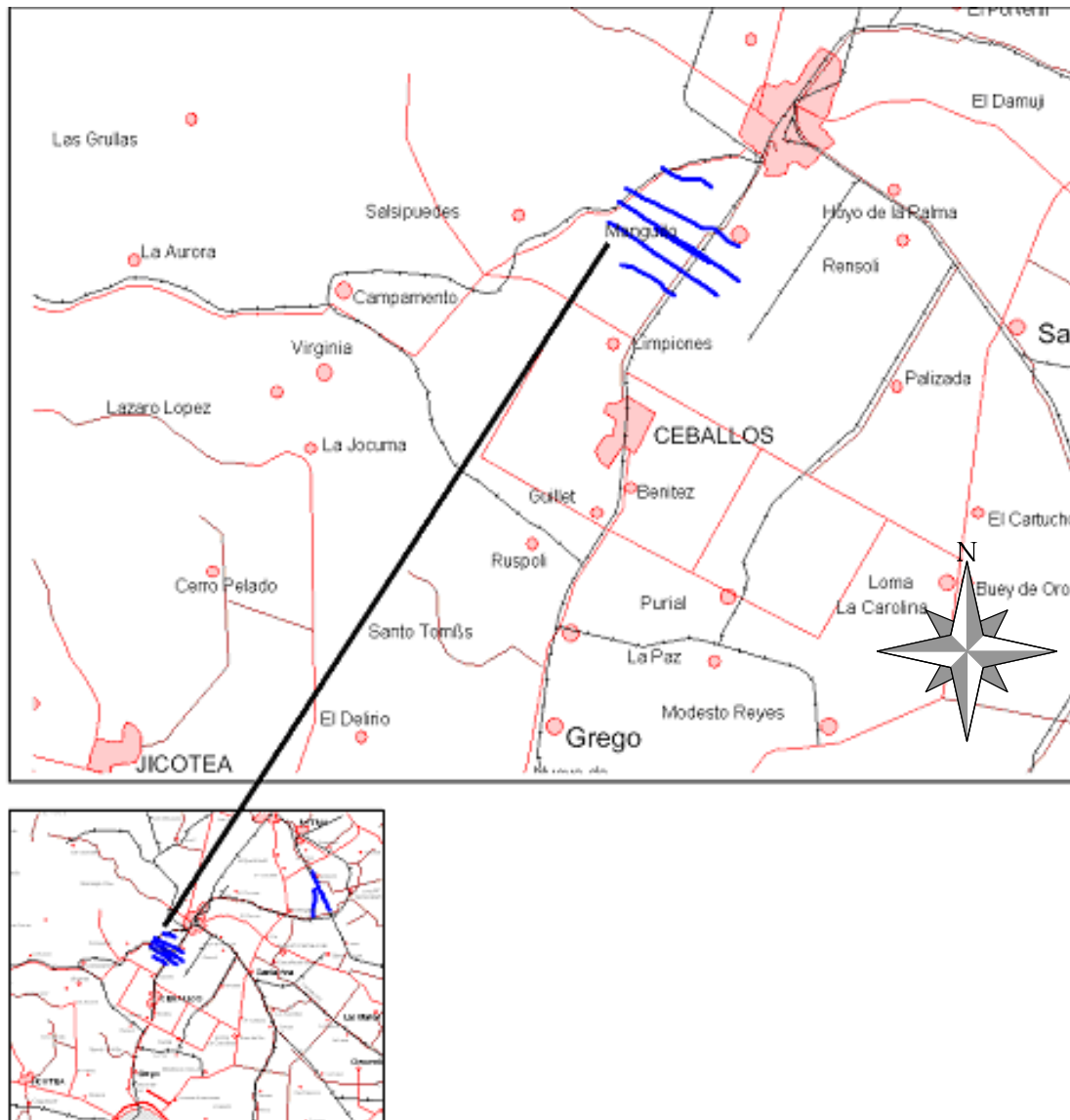


Figura IV.6. Posición cartográfica relativa de los dos objetivos de este capítulo, de izquierda a derecha: Sector Cacahual y Sector Ceballos.

La Susceptibilidad Magnética Normalizada (K_n) exhibe un campo anómalo complicado (Fig. IV.7), caracterizado por incrementos del orden de 2.0-2.5, típicos de hidrocarburos con naturaleza pesada-pesada/ligera. La anomalía areal de K_n , ubicada dentro de la porción centro-occidental de la morfoestructura, con igual rumbo y dimensiones de 1.9x1.2 km, define, con buena aproximación, la cartografía del posible reservorio.

Tabla IV.1 Valores correspondiente al Perfil 2T, respecto a los atributos observados y su correspondiente valor de fondo en cada estación.

Estaca	Kappa			Redox R			Reflectancia Espec.		
	Kappa	Kn	Fondo	Redox	Ur	Fondo	RE	Rer	Fondo
0	0.35	0.61	0.58	198.00	-6.95	204.95	5.87	-2.83	8.70
25	0.56	0.96	0.58	273.60	-15.30	288.90	4.53	-4.17	8.70
50	0.61	1.05	0.58	230.30	-58.60	288.90	4.58	-4.12	8.70
75	0.36	0.62	0.58	262.10	-26.80	288.90	4.63	-4.07	8.70
100	0.84	1.44	0.58	183.20	-21.75	204.95	8.76	0.06	8.70
125	2.01	3.46	0.58	205.40	0.45	204.95	3.87	-4.83	8.70
150	0.90	1.56	0.58	204.50	-0.45	204.95	4.40	-4.30	8.70
175	1.60	2.76	0.58	215.70	10.75	204.95	3.38	-5.32	8.70
200	1.16	1.99	0.58	211.40	6.45	204.95	3.99	-4.71	8.70
225	0.90	1.55	0.58	190.50	-14.45	204.95	6.12	-2.58	8.70
250	1.12	1.93	0.58	201.50	-3.45	204.95	4.91	-3.79	8.70
275	1.14	1.97	0.58	194.20	-10.75	204.95	7.06	-1.64	8.70
300	0.94	1.61	0.58	170.20	-34.75	204.95	10.28	1.58	8.70
325	1.69	1.16	1.45	173.90	-31.05	204.95	4.35	-4.35	8.70

Tabla IV.2 Valores correspondiente al Perfil 2T, respecto al contenido de los elementos químicos de las muestras tomadas y el valor de fondo para cada estación.

Estaca	Fe			Ni			V			Zn		
	EQ	EQ N	Fondo	EQ	EQ N	Fondo	EQ	EQ N	Fondo	EQ	EQ N	Fondo
0	5.19	1.65	3.14	171.00	1.77	96.50	182.00	3.19	129.00	60.00	1.24	48.33
25	5.45	1.73	3.14	213.00	2.21	96.50	196.00	3.44	129.00	71.00	1.47	48.33
50	5.15	1.64	3.14	206.00	2.13	96.50	175.00	3.07	129.00	69.00	1.43	48.33
75	5.66	1.80	3.14	184.00	1.91	96.50	197.00	3.46	129.00	82.00	1.70	48.33
100	2.95	0.94	3.14	122.00	1.26	96.50	108.00	1.89	129.00	51.00	1.06	48.33
125	6.84	2.18	3.14	308.00	3.19	96.50	249.00	4.37	129.00	87.00	1.80	48.33
150	6.40	2.04	3.14	252.00	2.61	96.50	254.00	4.46	129.00	73.00	1.51	48.33
175	6.83	2.17	3.14	206.00	2.13	96.50	283.00	4.96	129.00	47.00	0.97	48.33
200	6.22	1.98	3.14	157.00	1.63	96.50	239.00	4.19	129.00	63.00	1.30	48.33
225	5.40	1.72	3.14	158.00	1.64	96.50	244.00	4.28	129.00	48.00	0.99	48.33
250	5.61	1.78	3.14	158.00	1.64	96.50	248.00	4.35	129.00	66.00	1.37	48.33
275	4.25	1.35	3.14	105.00	1.09	96.50	188.00	3.30	129.00	50.00	1.03	48.33
300	2.23	0.71	3.14	71.00	0.74	96.50	104.00	1.82	129.00	93.00	1.92	48.33
325	5.91	1.88	3.14	196.00	2.03	96.50	240.00	4.21	129.00	62.00	1.28	48.33

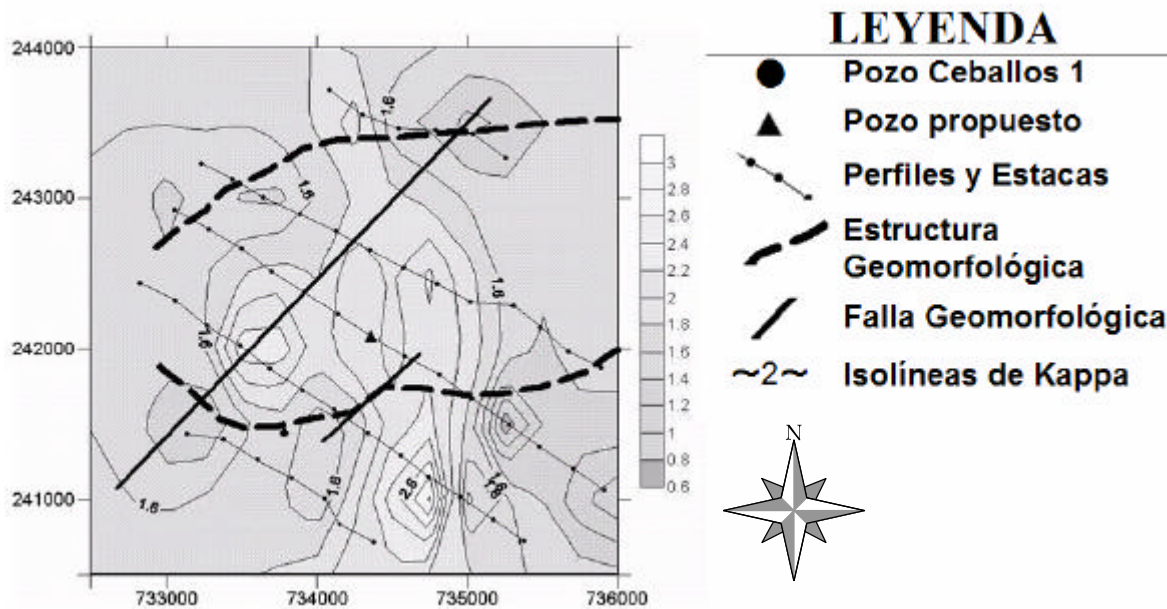


Figura IV.7. Mapa de la Susceptibilidad Magnética Normalizada (K_n) del sector Ceballos.

El Potencial Redox Reducido (U_r) presenta un campo en extremo complicado (Fig. IV.8), caracterizado por su desarticulación (carácter de serrucho) y existencia de valores máximos locales, como los que identifican la parte central más elevada del presunto reservorio, indicativo de la presencia de un hidrocarburo de naturaleza ligera o, más probablemente, de un casquete de gas.

La Pedogeoquímica, realizada en los perfiles centrales 1T y 2T, exhibe incrementos de Ni y V que tienen una excelente correspondencia espacial con los límites de la morfoestructura y con las curvas de K_n , U_r y RE_r . La interpretación de los datos geoquímicos arroja una natural eza pesada para el hidrocarburo, a partir de un valor del Grado Redox =9 (equivalente inorgánico del Grado API).

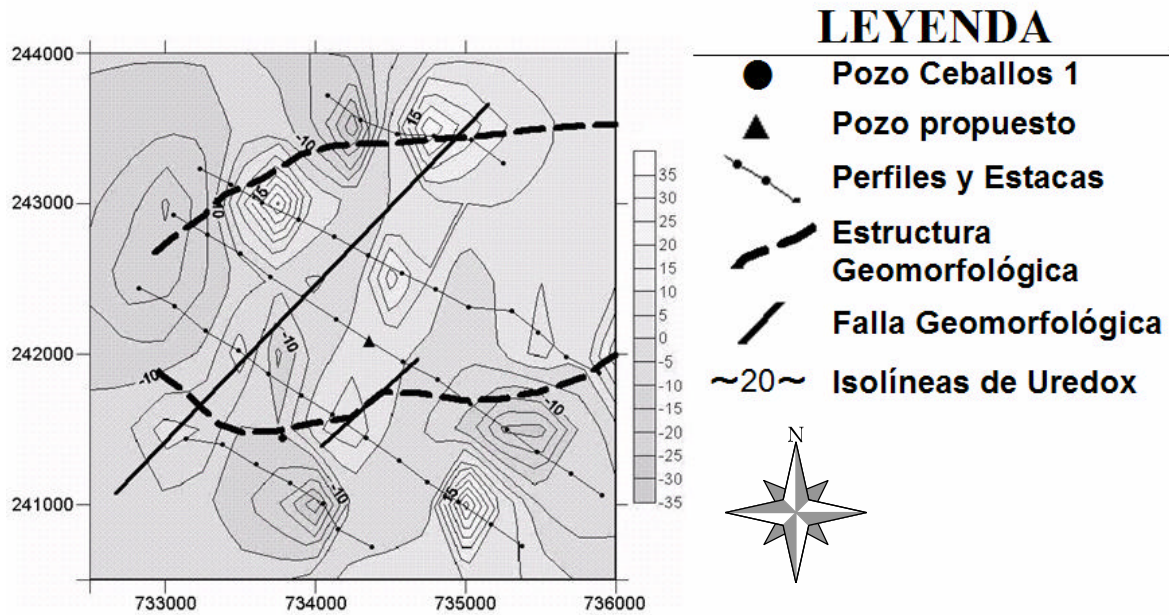


Figura IV.8. Mapa del Potencial Redox Reducido (U_r) del sector Ceballos.

La interpretación cuantitativa final de los datos del **Complejo Redox** realizada para el Perfil central 2T (Fig. IV.9), revelan una trampa contra falla (al Sur) cuya parte más alta se halla a una profundidad de 900 ± 100 m (dato conciliado con la sísmica) y un posible casquete de gas a una profundidad de 550 ± 50 m.

Los comentarios que se ofrecen a continuación -interpretando los resultados- se relacionan con la información reinterpretada de los métodos convencionales de exploración, en el propósito de su confrontación -complementación con los resultados alcanzados por la **Tecnología Redox**.

El levantamiento estructural de la Sísmica de Reflexión 2D (Fig. IV.2) (DigiCupet, 2002), fue el elemento que decidió la realización del presente trabajo y guió, junto con la geomorfología, la ubicación de los perfiles dentro del sector. La dirección sublongitudinal del levantamiento estructural y su morfología, en general, son consis-

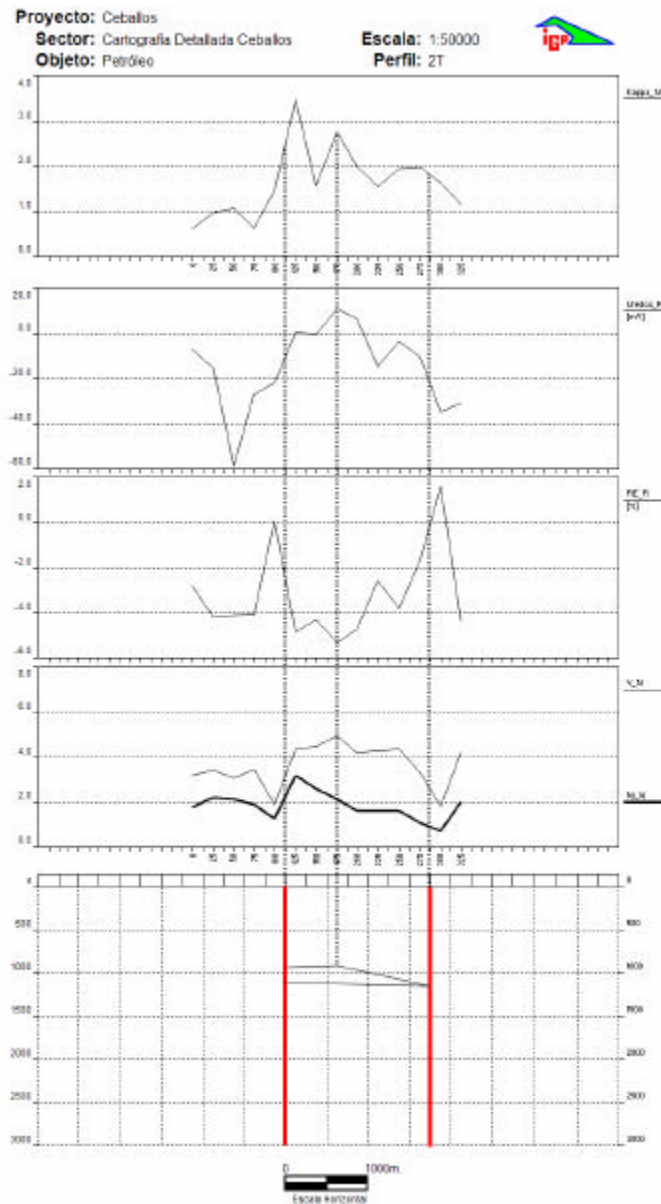


Figura IV.9. Interpretación cuantitativa de los datos del **Complejo Redox** en el Perfil Central 2T del sector Ceballos.

tentes con una trampa tipo contra-falla, pero en su límite meridional la falla limítrofe tiene rumbo NE, no sublatitudinal, siendo este el principal elemento contrastante con respecto a la información resultante.

La gravimetría residual con Radio de Promediación 2.0 km (Fig. IV.10) [Ipatenko, V. I., Rodríguez, M. (1981)], exhibe un mínimo de -1.8 mGal, con dos epicentros más intensos, de dirección sublatitudinal y dimensiones 2.2x0.7 km, cuya posición espacial la ubica, con bastante aproximación, sobre el presunto reservorio.

Aunque una explicación a tal coincidencia resulta un tanto complicada, pudiera pensarse en su asociación con un posible casquete de gas.

El campo aeromagnético Reducido al Polo (Fig. IV.11) refleja, muy representativamente, una trampa estructural contra-falla, con límite Sur en un notable escalón magnético de dirección sublatitudinal, y un hundimiento suave con rumbo sublongitudinal, en cuyo límite septentrional alcanza los valores mínimos de -150 nT. En general, este campo físico es el que mejor expresa la situación estructural del sector, conforme a la información resultante.

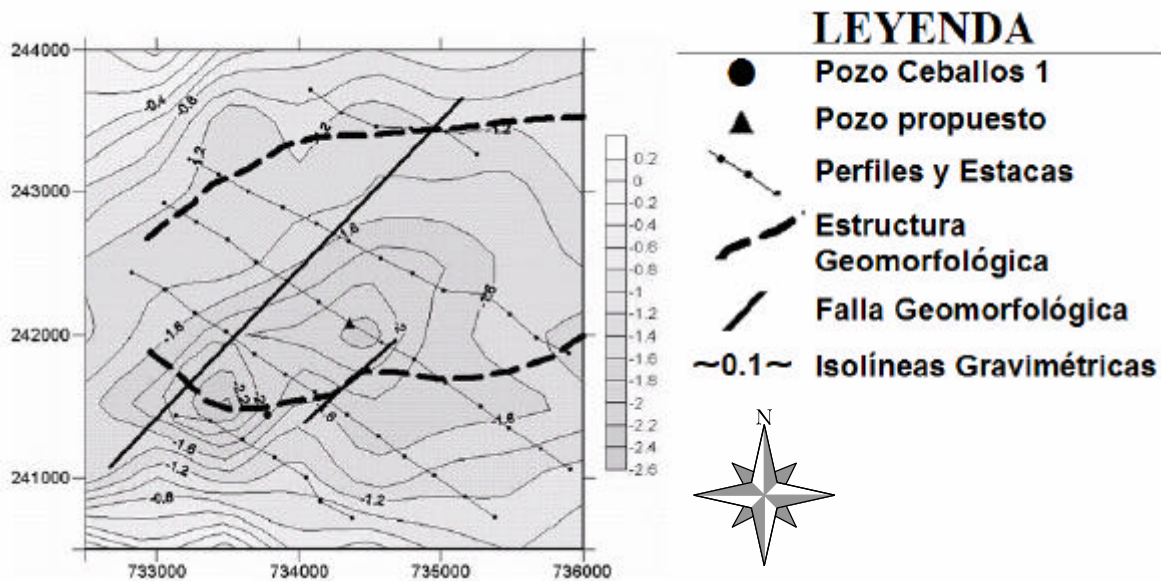


Figura IV.10. Mapa Gravimétrico Residual con Radio de Promediación de 2 km del sector Ceballos.

En la Fig. IV.12 se comparan de los resultados del **Complejo Redox** con una interpretación del levantamiento estructural de la Sísmica de Reflexión 2D. En esta interpretación, se propone una profundidad de la cúpula de Ceballos de 1000 m contra los 900 ± 100 m de la interpretación del Perfil 2T del **Complejo Redox**.

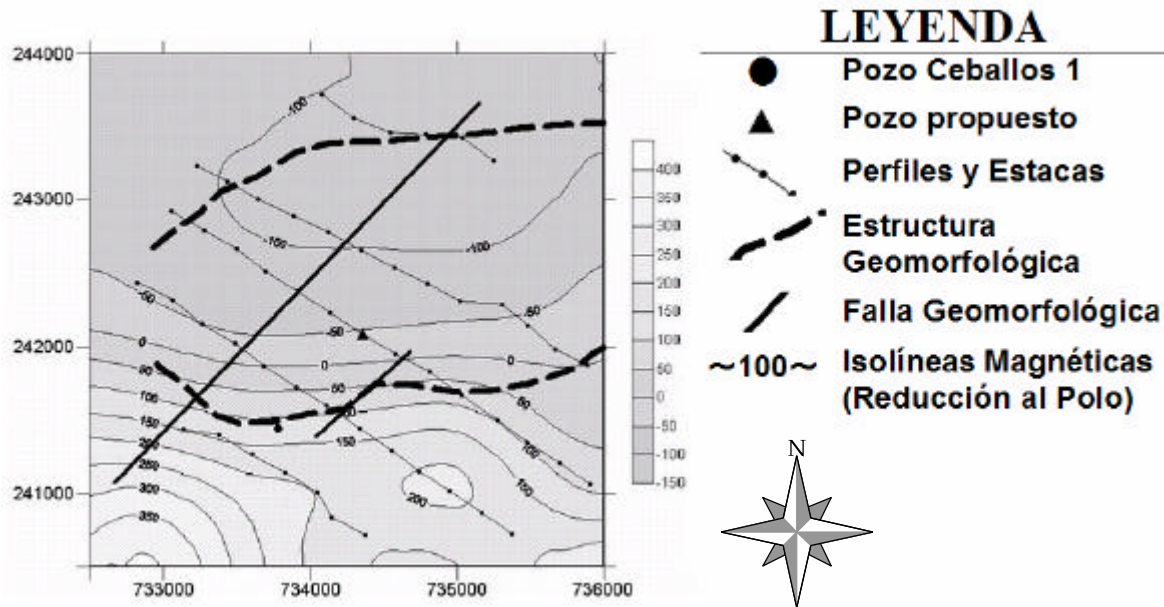
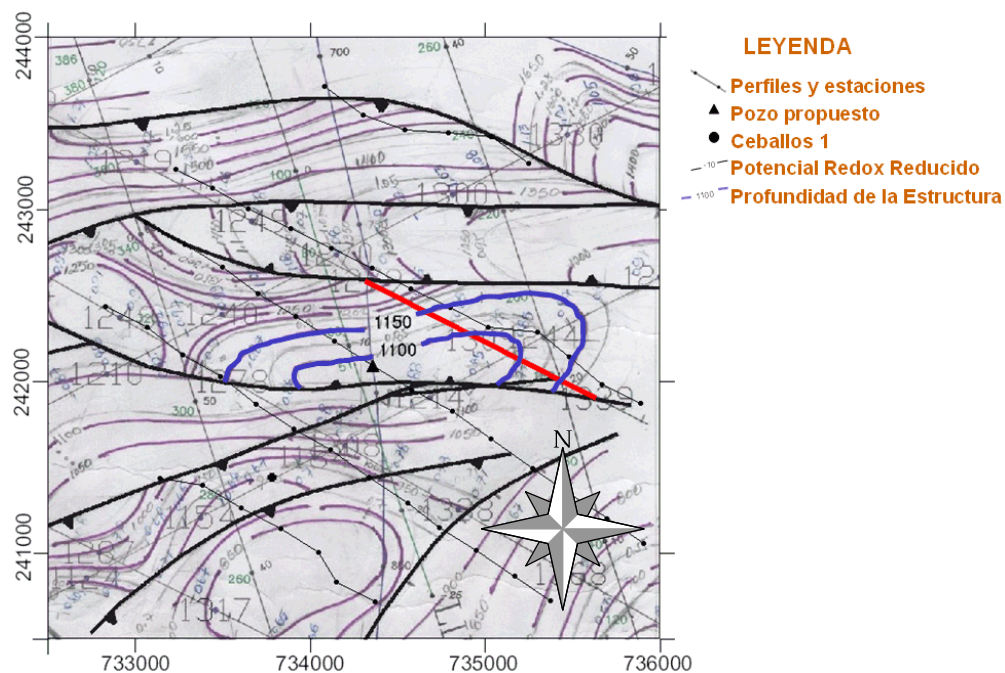


Figura IV.11. Mapa Aeromagnético Reducido al Polo del sector Ceballos.

Figura IV.12. Comparación de los resultados del **Complejo Redox** con el levantamiento estructural de la Sísmica de Reflexión 2D.

IV.3. Sector Cacahual.

El Centro de Investigaciones del Petróleo, en coordinación con la EPEP Majagua, contrataron los servicios del IGP para evaluar, mediante la **Tecnología Redox**, un

prospecto petrolífero en el área de Cacahual, provincia de Ciego de Ávila, Cuba (Fig. IV.13). La tarea planteada consistía en el Reconocimiento del posible prospecto, estableciendo criterios sobre su tipo estructural, profundidad y naturaleza del hidrocarburo. A partir de la confección e interpretación de Escenarios a Distancia (Satelital, Aerogammaespectrométrico y Aeromagnético), así como de Escenarios Locales (Gravimétrico y Geomorfológico) del sector se planificaron los trabajos de Reconocimiento por el **Complejo Redox** en dos líneas transversales al cuadro anómalo, con paso de observación 200 m, y transversales, también, a la estructura sísmica, revelada en el 2002 [DigiCupet (2002)].

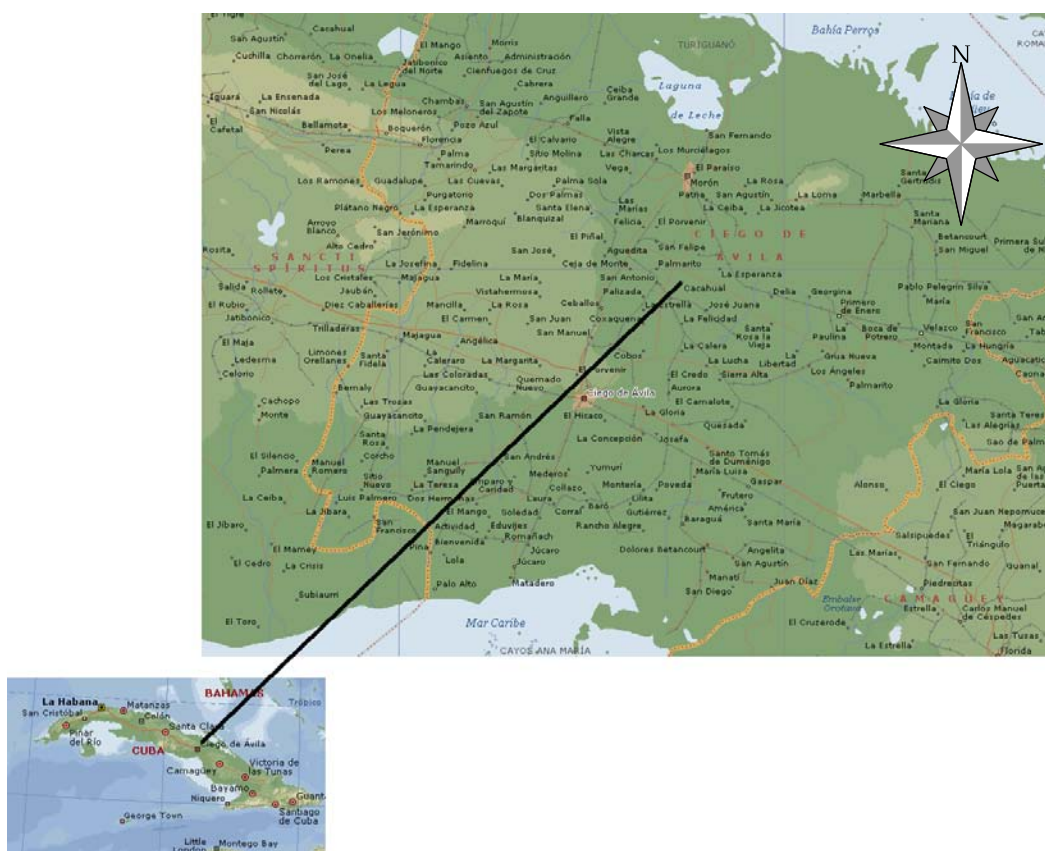


Figura IV.13. Ubicación geográfica de los Sector Cacahual.

El centro del sector Cacahual se encuentra ubicado a unos 7 km al NE del poblado Ciro Redondo (Pina) en la hoja cartográfica Ceballos (4481 -I), provincia de Ciego de Ávila. En el área fue perforado el pozo Cacahual -1, el cual no resultó productivo [Hidalgo, H., Varona, M. et al. (1989)]. El sector y, en general, la Cuenca Central, se caracteriza por pequeñas variaciones de los pisos y techos de las principales

secuencias (Post-orogénico, Orogénico y Pre -orogénico), que alcanza los 100 m de diferencia entre uno y otro. En el área, el Post -orogénico se detalla suficientemente, al menos, con el grado de conocimiento que se tiene hoy para su litología y diferentes colectores, los cuales se presentan como conglomerados tobáceos, tobas e intercalaciones de cuerpos calcáreos.

Como técnica aerogeofísica convencional se empleó, para el análisis e interpretación de los datos, la Reducción al Polo del campo aeromagnético anómalo del sector. Los datos aerogammaespectrométricos y aeromagnéticos utilizados en este trabajo [Liubi, L. I., Martinova, T. V. et al. (1984)] consideran líneas de vuelo con distancia de 500 m y altura de vuelo 70 m.

El procesamiento de los datos gravimétricos [Ipatenko, V. I., Rodríguez, M. (1981)] consistió en una separación regional-residual por promediación ($R=2$ km), con el fin de identificar posibles anomalías residuales positivas (levantamientos del tope de las tobas) en el área.

El material utilizado para el Análisis Morfométrico estuvo integrado por las hojas topográficas del ICGC a escala 1:10 000 del sector de los trabajos. El procesamiento consistió en una separación regional -residual manual a partir de las curvas de nivel, con el fin de identificar y cartografiar las morfoestructuras positivas manifestadas en el área.

Dentro de los resultados del sector Cacahual, se tiene que la Imagen Satelital (Fig. IV.14), exhibe una gran dispersión de anomalías residuales tonales de diferentes tamaños y formas, pero en la posición de la estructura sísmica estas anomalías prácticamente están ausentes poniendo de manifiesto la falta de interrelación entre ellas.

El campo aerogammaespectrométrico de la Relación K/eTh (Fig. IV.15), presenta un cuadro anómalo totalmente coherente con la estructura sísmica, consistente en un mínimo central sobre el posible reservorio, rodeado de una cadena de máximos en la posición del presumible límite agua -petróleo. Esta información apunta, con gran probabilidad, a la existencia de una estructura cargada.

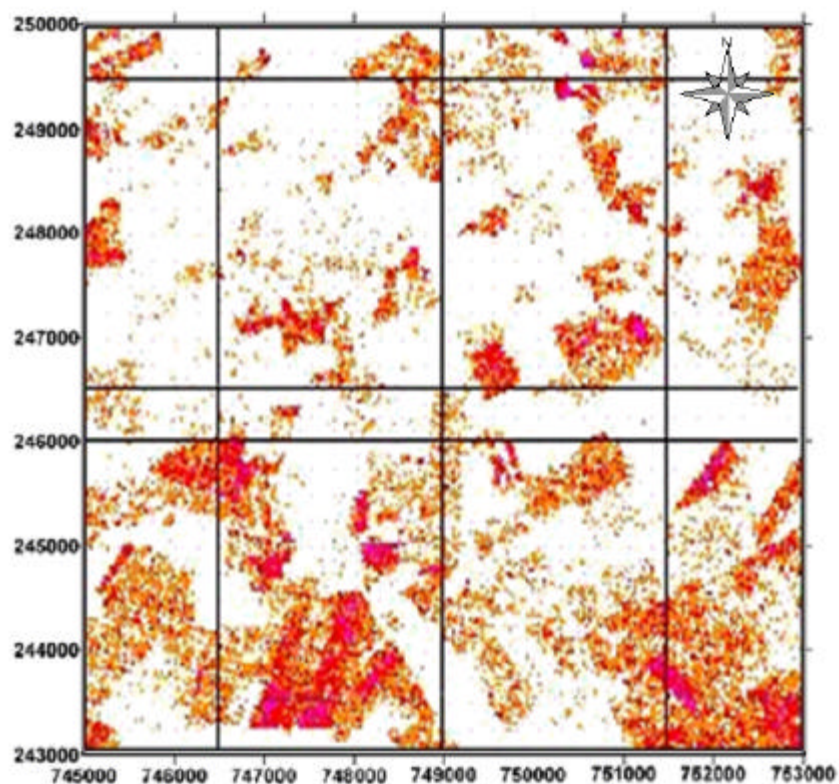


Figura II.14. Imagen Satelital del sector Cacahual.

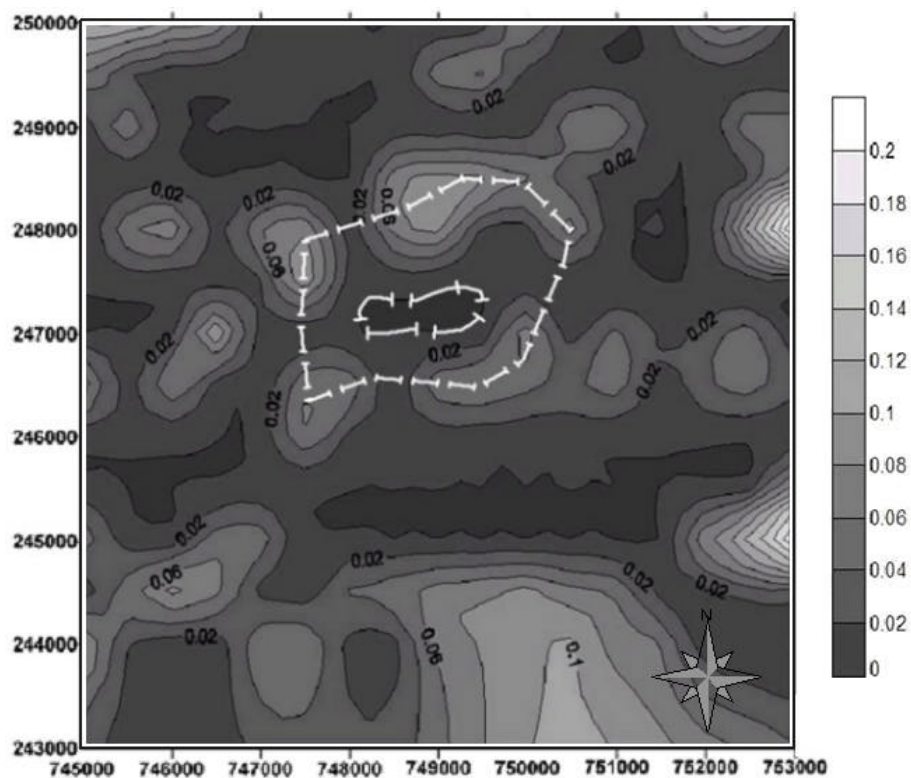


Figura IV.15. Mapa Aerogammaespectrométrico (K/eTh) del sector Cacahual .

El campo aeromagnético Reducido al Polo (Fig . IV.16), exhibe un cuadro anómalo complicado de mínimos y máximo de diferentes rumbos, los cuales no guardan relación alguna con la estructura sísmica cartografiada.

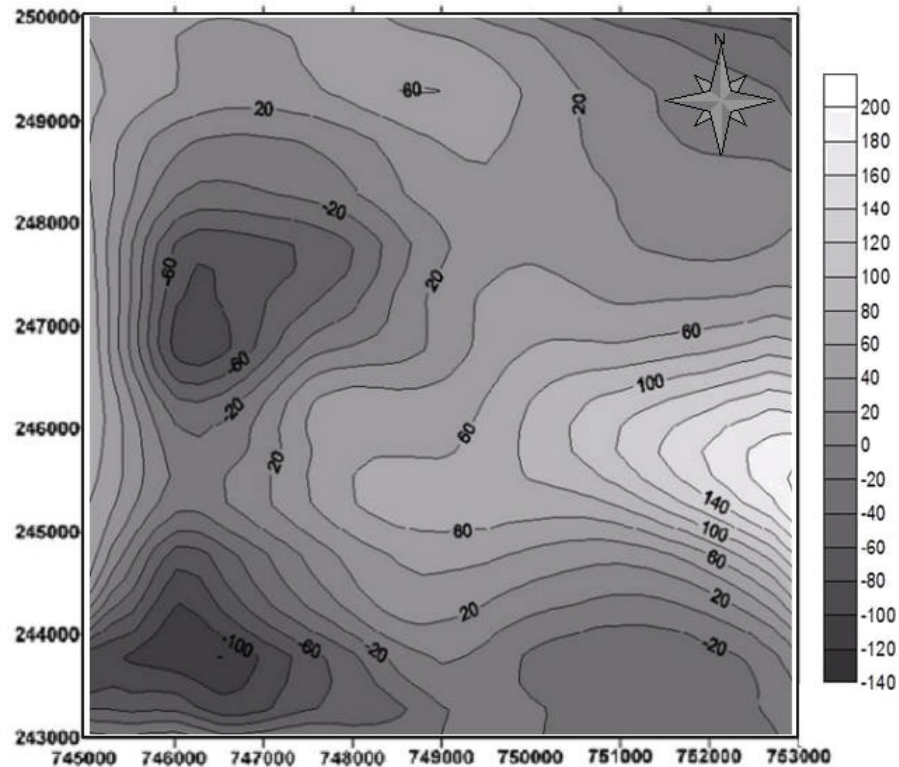


Figura IV.16. Mapa Aeromagnético Reducido al Polo en nT del sector Cacahual.

El campo gravimétrico residual (Fig . IV.17), presenta un cuadro caracterizado por una zona de mínimo de rumbo latitudinal en cuya p arte central, coincidente con la estructura sísmica, tiene lugar un estrechamiento y debilitamiento de su intensidad, pudiendo poner de manifiesto cierto reflejo de su existencia.

El trazado de máximos residuales del relieve (Fig . IV.18), puso de manifiesto la presencia de dos lóbulos los cuales se interceptan, prácticamente, sobre la estructura sísmica, revelando una anomalía de interés conformada por dos epicentros.

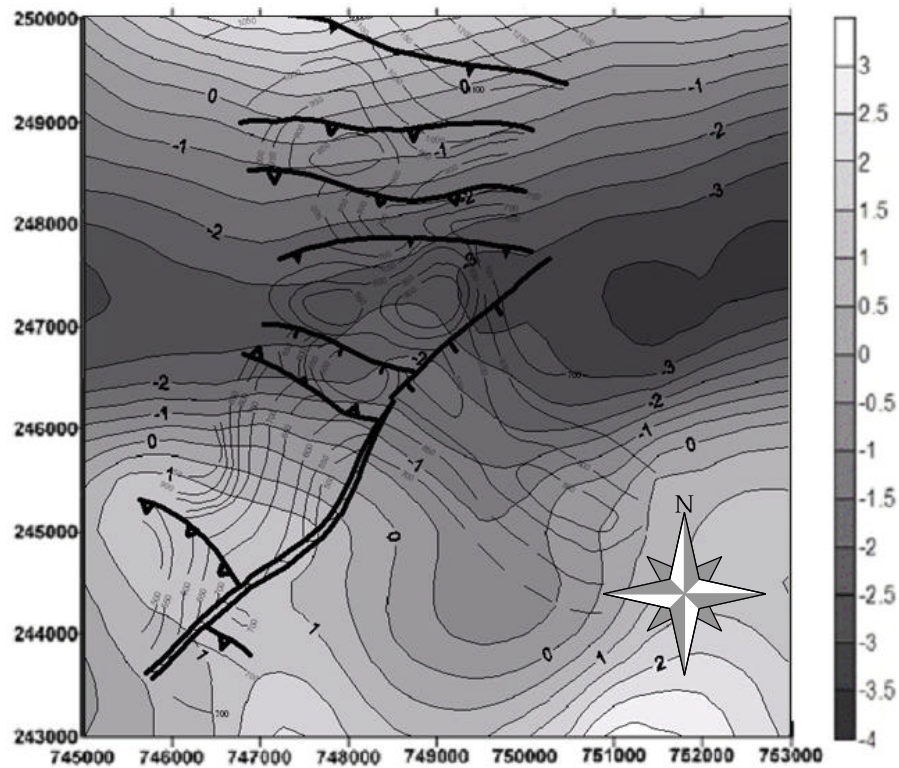


Figura IV.17. Mapa Gravimétrico Residual en miligales (R=2km) y el resultado de la interpretación sísmica del sector Cacahual.

Del examen de los Escenarios a Distancia y Local, y su comparación con la estructura sísmica, se puede decir que solo el campo aerogammaespectrométrico de la Relación K/eTh y, parcialmente, los máximos residuales del relieve ponen de manifiesto la existencia de un posible reservorio. La correspondencia revelada acusa a las alteraciones geoquímicas secundarias de lixiviación del potasio y la presencia de carbonatización y/o silicificación que tienen lugar sobre las ocurrencias de hidrocarburos.

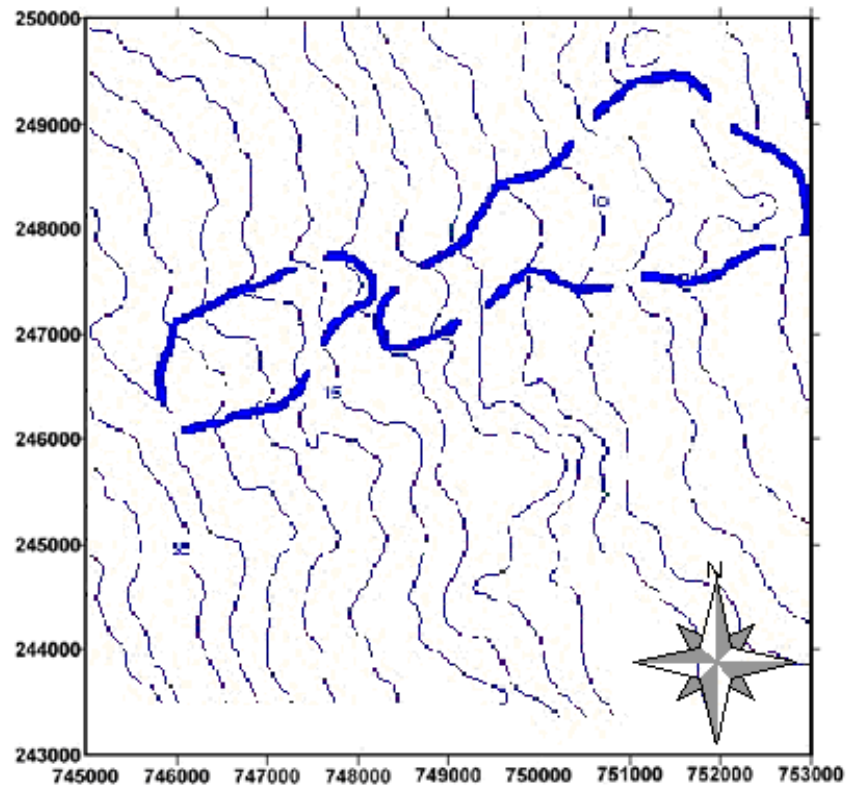


Figura IV.18. Mapa Topográfico y contornos de los máximos morfométricos del sector Cacahual.

Sobre los trabajos del **Complejo Redox** realizados a lo largo de los perfiles transversales LF y T (Fig. IV.19) trazados a partir solamente de las líneas sísmicas existentes en aquel momento (Fig. IV.20), se tiene que en la Tabla IV.3, se muestran los valores del Perfil LF para cada uno de los atributos y en la Tabla IV.4, los valores correspondiente al mismo perfil pero de los valores de contenido de metales.

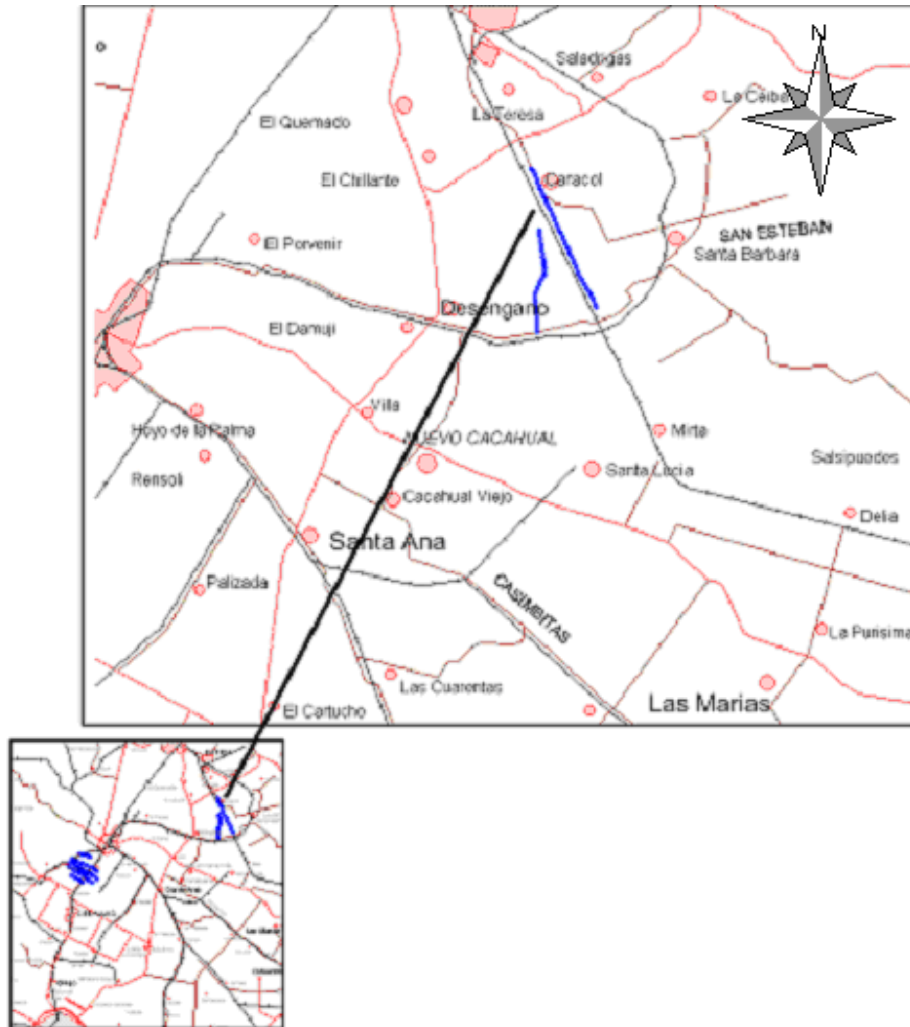


Figura IV.19. Posición cartográfica relativa de los dos objetivos de este capítulo, de izquierda a derecha: Sector Cacaahual y Sector Ceballos.

Estos perfiles revelan una gran coincidencia entre los intervalos anómalos determinados (para la línea LF, las estaciones 160-260, y para la línea T, las estaciones 180-260) y la estructura sísmica, a pesar de la gran complejidad observada en el comportamiento de los atributos medidos. El criterio básico seguido para establecer los referidos intervalos anómalos fue la correspondencia de máximos de la Susceptibilidad Magnética con mínimos del Potencial Redox, tal y como se muestra en la Fig. IV.21, para la línea T.

Tabla IV.3 Valores correspondiente al Perfil LF, respecto a los atributos observados y su correspondiente valor de fondo en cada estación.

Estaca	Kappa			Redox R			Reflectancia Espec.		
	Kappa	Kn	Fondo	Redox	Ur	Fondo	RE	Rer	Fondo
0	3.07	7.87	0.39	131	-48.25	179.25	11.22	1.46	9.76
20	2.35	6.03	0.39	162	-17.25	179.25	8.89	-0.87	9.76
40	3.52	9.03	0.39	179	-0.25	179.25	5.09	-4.67	9.76
60	2.35	6.03	0.39	172	-7.25	179.25	5.82	-3.94	9.76
80	2.27	5.82	0.39	178	-1.25	179.25	5.29	-4.47	9.76
100	3.1	7.95	0.39	168	-11.25	179.25	6.81	-2.95	9.76
120	2.74	7.03	0.39	162	-17.25	179.25	4.65	-5.11	9.76
140	2.87	7.36	0.39	175	-4.25	179.25	4.59	-5.17	9.76
160	3.86	9.9	0.39	211	31.75	179.25	3.99	-5.77	9.76
180	3.27	8.38	0.39	157	-22.25	179.25	4.29	-5.47	9.76
200	3.41	8.74	0.39	158	-21.25	179.25	4.08	-5.68	9.76
220	3.16	8.1	0.39	176	-3.25	179.25	4.45	-5.31	9.76
240	2.97	7.62	0.39	153	-26.25	179.25	4.05	-5.71	9.76
260	0.39	1	0.39	199	19.75	179.25	6.23	-3.53	9.76
280	0.79	2.03	0.39	193	13.75	179.25	7.64	-2.12	9.76
300	0.57	1.46	0.39	184	4.75	179.25	9.09	-0.67	9.76
320	2.73	7	0.39	166	-13.25	179.25	6.35	-3.41	9.76
340	5.54	14.21	0.39	145	-34.25	179.25	5.17	-4.59	9.76
360	2.75	7.05	0.39	143	-36.25	179.25	7.19	-2.57	9.76
380	1.2	3.08	0.39	164	-15.25	179.25	6.75	-3.01	9.76
400	1.14	2.92	0.39	160	-19.25	179.25	11.96	2.2	9.76

Tabla IV.4 Valores correspondiente al Perfil LF, respecto al contenido de los elementos químicos de las muestras tomadas y el valor de fondo para cada estación.

Estaca	Fe			Ni			V			Zn		
	EQ	EQ N	Fondo	EQ	EQ N	Fondo	EQ	EQ N	Fondo	EQ	EQ N	Fondo
0	3.44	0.65	5.302	256	0.97	263.75	111	0.6	183.75	83	1.25	66.25
20	5.15	0.97	5.302	305	1.16	263.75	145	0.79	183.75	190	2.87	66.25
40	8.5	1.6	5.302	332	1.26	263.75	297	1.62	183.75	80	1.21	66.25
60	8.02	1.51	5.302	309	1.17	263.75	284	1.55	183.75	69	1.04	66.25
80	8.17	1.54	5.302	374	1.42	263.75	289	1.57	183.75	69	1.04	66.25
100	6.33	1.19	5.302	271	1.03	263.75	218	1.19	183.75	75	1.13	66.25
120	7.89	1.49	5.302	345	1.31	263.75	270	1.47	183.75	124	1.87	66.25
140	8.23	1.55	5.302	352	1.33	263.75	291	1.58	183.75	71	1.07	66.25
160	7.81	1.47	5.302	298	1.13	263.75	277	1.51	183.75	68	1.03	66.25
180	8.88	1.67	5.302	348	1.32	263.75	316	1.72	183.75	83	1.25	66.25
200	8.67	1.64	5.302	392	1.49	263.75	303	1.65	183.75	87	1.31	66.25
220	9.93	1.87	5.302	423	1.6	263.75	320	1.74	183.75	88	1.33	66.25
240	9.28	1.75	5.302	388	1.47	263.75	298	1.62	183.75	83	1.25	66.25
260	9.08	1.71	5.302	434	1.65	263.75	304	1.65	183.75	99	1.49	66.25
280	8.95	1.69	5.302	436	1.65	263.75	312	1.7	183.75	84	1.27	66.25
300	5.58	1.05	5.302	253	0.96	263.75	203	1.1	183.75	59	0.89	66.25
320	8.22	1.55	5.302	354	1.34	263.75	260	1.41	183.75	109	1.65	66.25
340	8.27	1.56	5.302	344	1.3	263.75	240	1.31	183.75	464	7	66.25
360	7.58	1.43	5.302	308	1.17	263.75	243	1.32	183.75	194	2.93	66.25
380	9.2	1.74	5.302	470	1.78	263.75	299	1.63	183.75	86	1.3	66.25
400	6.01	1.13	5.302	275	1.04	263.75	203	1.1	183.75	104	1.57	66.25

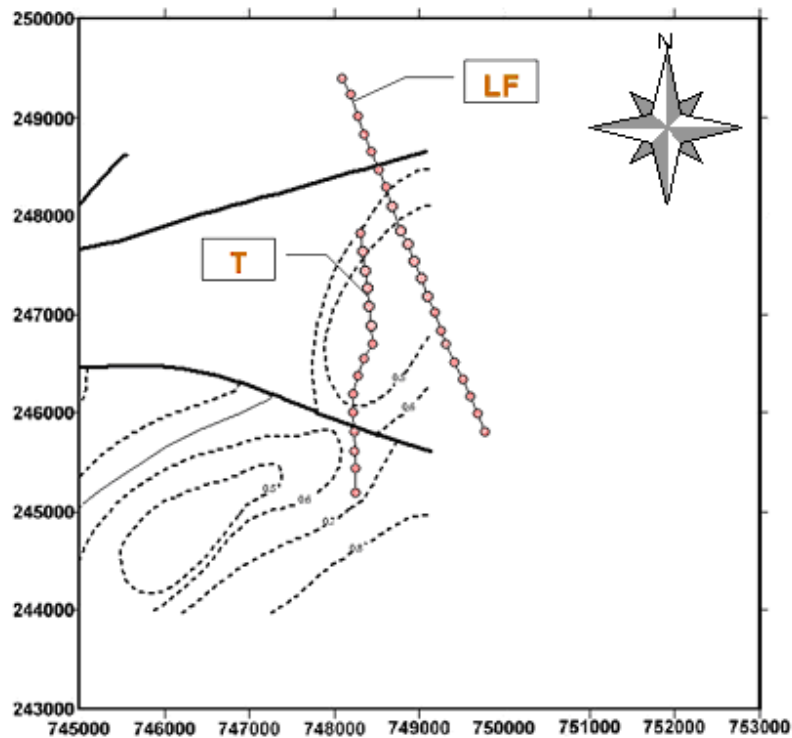


Figura IV.20. Sísmica existente y sistema de perfiles del **Complejo Redox** en el sector Cacahual.

La interpretación cuantitativa de los datos del **Complejo Redox** se basa en el conocimiento del contenido de los elementos químicos, en particular del Ni, para poder determinar profundidades y establecer el estilo geométrico de la posible trampa. También, la calidad del hidrocarburo se estima a partir de los contenidos de fondo de los elementos Ni, V, Fe y Zn. Estos datos químicos, los cuales se disponen solo para la línea LF, resultaron totalmente anómalos (exageradamente elevados los niveles de fondo: Ni -264 ppm, V-184 ppm y Fe-5,3%), lo cual impide realizar el proceso de interpretación cuantitativa. Esta información acusa, en consecuencia, a un reservorio mal preservado (sin sello o sello fracturado), lo cual provoca, presumiblemente, una gran contaminación de hidrocarburos gaseosos en el sector.

Proyecto: Cacahual

Orientación: S-N

Sector: Reconocimiento Cacahual

Escala: 1:40000

Objeto: Petróleo

Perfil: T

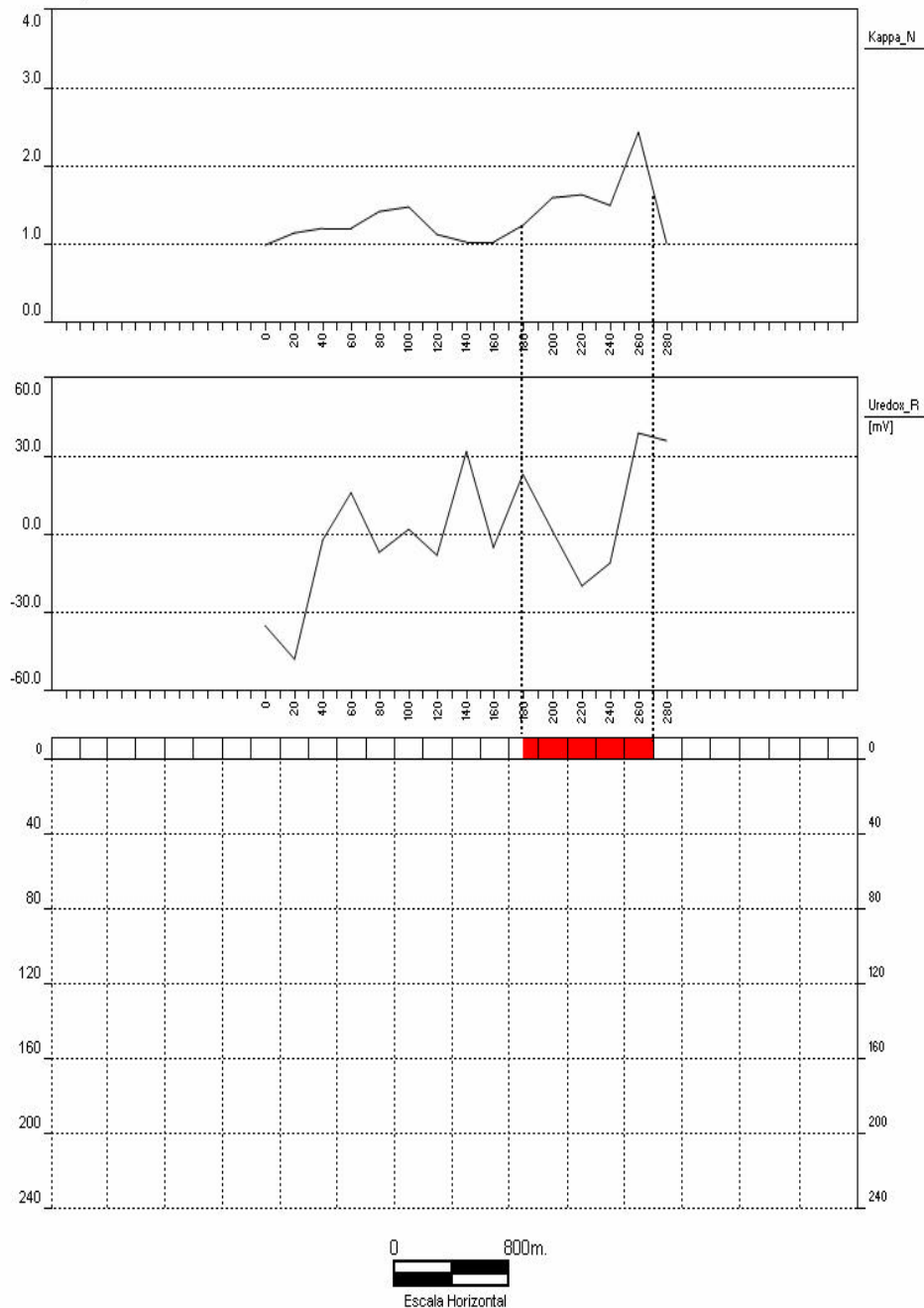


Figura IV.21. Interpretación de los datos del **Complejo Redox** en el Perfil T del sector C acahual.

Este criterio es apoyado, también, por la alta complejidad de los atributos medidos, la cual provoca una correlación poco clara de los intervalos anómalos para cada atributo. Sobre la comprobación geológica de la estructura sísmica se pudo

establecer, mediante el reconocimiento geológico de campo, que sobre la parte cupular de la estructura sísmica no existe sello (hecho que confirma la información suministrada por el **Complejo Redox**), por lo que se decidió realizar la perforación exploratoria (Pozo Villa) en el flanco septentrional del lóbulo oriental, el cual cuenta con sello producto de la existencia de una falla. El pozo perforado corrobora lo expuesto anteriormente por la aplicación de La **Tecnología Redox** (Fig. IV. 22).

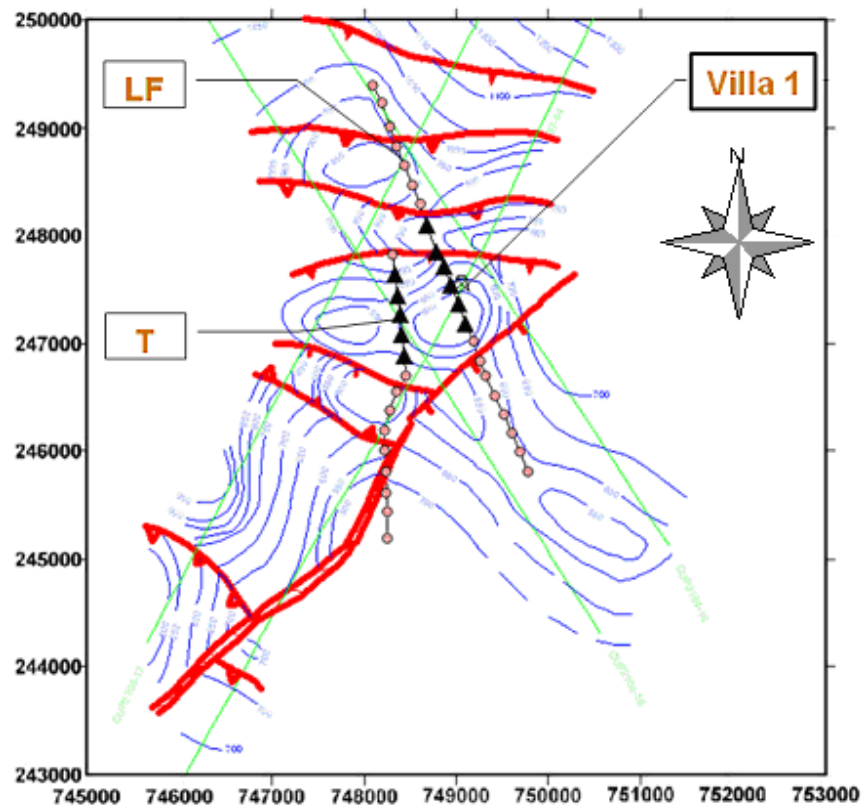


Figura IV.22. Datos combinados del sector Cacahual y ubicación del pozo Villa en el sector Cacahual.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Con respecto a la Modelación Matemática para el proceso de interpretación se tienen las siguientes conclusiones:

- ✍ Se pudo modelar con buen acierto, la determinación del Nivel de Fondo de los atributos del **Complejo Redox**.
- ✍ Se establecieron los Intervalos de Respuesta Anómala por Atributos (**IRAA**) a partir de las inferencias para cada atributo.
- ✍ Se logró obtener los Intervalos de Respuesta Anómala del Perfil (**IRA**) y los Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (**PARA**), automáticamente, a partir de la modelación de la experiencia del Experto.
- ✍ Se pudo modelar la obtención de los Puntos Singulares (**PS**), elementos base importantes para el posterior desarrollo del resultado de la interpretación.
- ✍ Se conformó el algoritmo para la determinación de las dependencias entre los atributos, automáticamente, sin necesidad de un proceso interactivo Hombre-Máquina.
- ✍ Se calcularon las profundidades bajo los Puntos Singulares a partir de las expresiones empíricas definidas en el Capítulo II, las cuales se evaluaron mediante un algoritmo de aproximación sucesiva, por ser estas expresiones implícitas.
- ✍ Se logró el proceso de depuración de las profundidades a partir de los atributos para una estación se logró establecer, con el algoritmo que localiza el conjunto de profundidades más agrupadas y extrae de este grupo la profundidad media representativa y el error relativo involucrado.
- ✍ Se definieron los cuatro Patrones: Yacimiento Cristales, Yacimiento Jatibonico, el sector Jatibonico Oeste y el sector Jatibonico Nuevo. Estos Patrones fueron procesados de forma multivariada para constatar la validez de los atributos utilizados.

- ✍ Se estableció una Medida de Similitud en un espacio métrico para la clasificación de nuevos objetivos interpretados y además se definió un índice de cercanía a partir de una medida estándar entre dos patrones más parecidos a partir de sus atributos.
- ✍ Se logró un algoritmo que obtiene la geometrización el modelo general del prospecto.
- ✍ Se generó a partir de la geometrización del modelo, la estimación volumétrica del mismo.

Con respecto a la Validación de la Modelación Matemática se tiene la siguiente conclusión:

- ✍ Se logró una validación adecuada de la Modelación Matemática, tanto para la determinación del Nivel de Fondo, como para el proceso de interpretación, aplicado ejemplificadamente en el yacimiento de Cristales.

Sobre la aplicación de la **Tecnología Redox** a la exploración petrolera en el sector Ceballos de Cuenca Central, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- ✍ Desde el punto de vista geomorfológico, el área de Ceballos se identifica por una morfoestructura positiva de dirección sublatitudinal ($Az=80^\circ$) y dimensiones 3.6x1.65 km, cuyos límites Sur y Norte coinciden con cañadas, las cuales parecen ser el reflejo de fallas regionales.
- ✍ El límite Sur el área de Ceballos coincide con un escalón gravimétrico, aeromagnético y aerogammaespectrométrico, revelando una falla detectada mediante balanza de torsión en la década de los 60, la cual fue referida como la posible continuación de la Falla Cristales .
- ✍ La morfoestructura del área de Ceballos , es atravesada en su porción occidental por una falla de rumbo NE ($Az=45^\circ$), la cual intercepta, por su centro, a la anomalía satelital indicadora de la presencia de hidrocarburos (naturaleza pesada), pudiendo constituir la vía para la migración del hidrocarburo entrampado.
- ✍ En el área de Ceballos, la anomalía areal de la Susceptibilidad Magnética, dentro de la porción centro -occidental de la morfoestructura, con igual rumbo y dimensiones de 1.9x1.2 km, define, con buena

aproximación, la cartografía del reservorio, el cual, a juzgar por los valores de K_n y de la interpretación de los datos geoquímicos (Grado Redox=9), contiene un hidrocarburo de naturaleza pesada.

- ✍ El carácter desarticulado y de máximos del Potencial Redox y los mínimos de la Gravimetría Residual del área de Ceballos evidencian la presencia de un posible casquete de gas en el reservorio.
- ✍ La interpretación final de los datos del **Complejo Redox** en el área de Ceballos, revelan una trampa contra falla (al Sur) cuya parte más alta se halla a una profundidad de 900 ± 100 m y un posible casquete de gas a una profundidad de 550 ± 50 m.

Sobre la aplicación de la **Tecnología Redox** a la exploración petrolera en el sector Cacahual de Cuenca Central, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- ✍ Del examen de los Escenarios a Distancia y Local, y su comparación con la estructura sísmica, puede concluirse que el campo aerogamma-espectrométrico de la Relación K/eTh y, parcialmente, los máximos residuales del relieve ponen de manifiesto la existencia de un posible reservorio. La correspondencia revelada acusa a las alteraciones geoquímicas secundarias de lixiviación del potasio y la presencia de carbonatización y/o silicificación que tienen lugar sobre las ocurrencias de hidrocarburos.
- ✍ Los trabajos del **Complejo Redox** realizados acusan a un reservorio mal preservado (sin sello o sello fracturado), lo cual provoca, presumiblemente, una gran contaminación areal de hidrocarburos gaseosos. Este criterio es apoyado, también, por la alta complejidad de los atributos medidos la cual provoca que la correlación en los intervalos anómalos para cada atributo sea poco clara.
- ✍ Los resultados de la perforación exploratoria (Pozo Villa) confirman los resultados del reconocimiento con la **Tecnología Redox**.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

Recomendamos algunos aspectos que creemos importantes para el desarrollo futuro del **Complejo Redox** y de su difusión en una aplicación más consistente y amplia:

1. Continuar perfeccionando la base científica y metodológica del **Complejo Redox**, pues es un complejo de métodos con una experiencia de aplicación y teoría joven (casi 16 años) y necesita aún más espacio para el desarrollo.
2. Se propone que el **Complejo Redox** sea aplicado, complementariamente, junto con el resto de los métodos convencionales de prospección. De esta manera, se tendrá un criterio, de naturaleza geoquímica, más para la toma de decisiones en la perforación exploratoria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alfonso, J. R., M. Pardo, et al. (1993). Informe sobre los trabajos metodológicos –experimentales de métodos geofísicos y geoquímicos no convencionales para la prospección de hidrocarburos someros en Cuba Septentrional (inédito). ENG, La Habana.
2. Berger, Z. (1994). Satellite Hydrocarbon Exploration Springer - Verlag, Editora Berlin Heidelberg, págs. 373.
3. Birell, R. (1996). MMI geochemistry: mapping the depths. Mining Magazine 174 (5): págs. 306-307.
4. Booch. G. (1996). Análisis y Diseño Orientado a Objetos con aplicaciones, 2ª edición, Addison-Wesley/Diaz de Santos. Available: http://www.cuspide.com/detalle_libro.php?isbn=9684443528. [citado mayo 2004].
5. Booch. G. et al. (1999). El lenguaje unificado de modelado. Available: <http://www.agapea.com/El-lenguaje-unificado-de-modelado-n11514i.htm>. [citado mayo 2004].
6. Capote, C. R. (1997). Aplicación de los sensores remotos en la Prospección mineral de las regiones central y centro -oriental de Cuba. Examen de Calificación. Instituto de Geociencias, Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil, 77 pp.
7. Davis, J.C. (1986). Statistics and data analysis in geology. John Willey and Sons. Inc. New York, 550 pp.
8. De Marco, T. (1982). Structured Analysis and System Specification. Yourdon Press. New York.
9. DIGICUPET (2002). Mapa estructural del Bloque 21, Cuenca Central, en base de la interpretación de la Sísmica de Reflexión 2D. ONRM, La Habana, Cuba.
10. Drury, S. A. (1993). Image interpretation in geology. 2nd ed. Chapman and Hall, London, pag. 283.

11. Gamma. E. et al. (2002). Patrones de Diseño, Addison -Wesley. Available: <http://www.info-ab.uclm.es/asignaturas/42579/pdf/04 -Capitulo4a.pdf>. [citado mayo 2004].
12. Gregory, A. F. (1956). Radiometric data applied to petroleum exploration. Bull. of the American Association of Petroleum Geology , 40 (10).
13. Hamilton, S. M. (1998). Electrochemical mass-transport in overburden: a new model to account for the formation of selective leach anomalies in glacial terrain. Journal of Geochemical Exploration, 63:155-172.
14. Hamilton, S. M. (1998). New Electrochemical Studies by Ontario Geological Survey, Explore No.101.
15. Hamilton, S. M. (2000). Spontaneous potentials and electrochemical cells. In; Geochemical Remote Sensing of the Subsurface. Handbook of Exploration Geochemistry, 7. Elsevier, Amsterdam, 81-119.
16. Hamilton, S. M., E. M. Cameron, M. B. Mc Clenaghan and G. E. M. Hall (2004). Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden (I): methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property. Geochemistry 4 (1): pag. 33-44.
17. Hidalgo, H., M. Varona, et al. (1989). Proyecto No. 1144, que ampara la perforación del pozo Francisco No.3. EPEP Majagua. ONR M, La Habana, Cuba.
18. Ipatenko, V. I., Rodríguez, M. (1981). Mapa Gravimétrico de Cuba a escala 1:100 000. ONRM, La Habana, Cuba.
19. Karbach, W., Linster, M., Voss, A. (1990). Model -Based approaches: One label-one idea? En Wielinga, Boose, Gaines Schreiber y Someren, Eds. Current Trend in Knowledge Acquisition. pp. 173-387. Amsterdam: IOS Press.
20. Kilmer, C. (1983). Mínimos de radiación sobre áreas productoras como un fenómeno geoquímico del suelo. Oil and Gas Journal, 81 (30).
21. Lehmann, C. H. (1974). Geometría Analítica. Editora Revolucionaria. Instituto Cubano del Libro. pp 494.
22. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. (1987). Remote Sensing and image interpretation. 2nd ed. John Wiley and Sons, New York, pag. 721.

23. Liubi, L. I., Martinova, T. V., et al. (1984). Informe sobre los resultados del levantamiento aerogeofísico a escala 1:50 000 en el territorio de las provincias Ciego de Ávila y Camagüey (en ruso) (inédito). CNFG, La Habana.
24. Lufriu, L., Padilla, I., Corbea, L. (1989). Utilización de la aerogamma-espectrometría en la búsqueda de petróleo y gas. Boletín Técnico de Petróleo MINBAS No. 2, 13-17.
25. Machado, B. R. (1988). ¿Cómo se forma un investigador? Editora Ciencias Sociales, La Habana.
26. Mann, A. W. (1997). The use of MMI in Mineral Exploration. 10th International Gold Symposium. Rio de Janeiro, Brazil.
27. Martínez, E. (1994). Ciencia, Tecnología y desarrollo: interrelaciones teóricas y metodológicas. Editora Nueva Sociedad, UNESCO, Caracas.
28. Moon, C. J., Khan, A. (1990). Mineral Exploration. Mining Annual Review 1990, págs. 203.
29. Morales P., et al. (1984). Metodología de la modelación económico - matemática. La Habana: Editorial Científico -Técnica.
30. Pardo, M. (1991). Tópicos metodológicos en las investigaciones geólogo - geofísicas aplicadas a la evaluación de recursos. Notas de Clase de Curso de Postgrado (inédito) IGP, La Habana, 70 p.
31. Pardo, M., et al. (1994). Informe del Tema (I+D) Fundamentación del pronóstico y de las direcciones de búsqueda para minerales sólidos en la Cúpula de Trinidad, macizo metamórfico de Escambray (inédito), IGP, La Habana.
32. Pardo, M., Álvarez, J., Echevarria, G. (1997). Técnicas geofísico - geoquímicas no convencionales para la prospección de hidrocarburos; progresos de su aplicación en Cuba. Memorias del III Congreso Cubano de Geología, vol. I, págs. 547-550.
33. Pardo, M.; Stout, R. (1999). El método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la kappametría a los fines de la prospección geológica. Memorias del I Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.

34. Pardo, M. (2000). Método de medición del Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la kappametría a los fines de la prospección geológica. Certificado de Invención No. 22635, OCPI, La Habana.
35. Pardo, M.; Stout, R. (2000). El método de Potencial Redox en la prospección de minerales; dos ejemplos: el yacimiento Mella y el stockwork La Unión. Memorias del IV Congreso Cubano de Geología, La Habana.
36. Pardo, M.; Stout, R. et al. (2000). Informe del TTP Aplicación de la medición in situ del Potencial Redox en suelos sobre objetivos de prospección de minerales metálicos e hidrocarburos (inédito). ONRM, La Habana.
37. Pardo, M.; Stout, R. (2001). El método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la kappametría a los fines de la prospección petrolífera. Memorias del II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
38. Pardo, M. (2001). Proyecto de Investigación–Desarrollo (227): Análisis teórico y diseño de los parámetros cuantitativos del Método Redox en áreas de control (inédito). IGP, La Habana.
39. Pardo, M., Stout, R., Kessell, E., Mugía, M., Morales, M., Rojas, F. (2001). La nueva técnica geoquímica de Potencial Redox en suelos: Principios y Aplicaciones. Memorias del II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
40. Pardo, M. (2003). Proyecto de Investigación –Desarrollo (244): Estimaciones cuantitativas por el **Complejo Redox** en su aplicación a la prospección geológica, los estudios medio – ambientales y arqueológicos (inédito). IGP, La Habana.
41. Pardo, M., et al. (2003). El **Complejo Redox**: Estado del Arte en el 2002. Memorias del V Congreso Cubano de Geología, La Habana.
42. Pardo, M, Rodríguez, O. (2005): Algoritmo para determinar el Nivel de Fondo de Atributos con Estructura de Datos Secuenciales Lineales en **La Tecnología Redox**. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. vol. 99.
43. Reenskaug. T., et al. (1996). Working with Objects, Manning. Available: <http://www.2020ok.com/4013.htm>. [citado mayo 2004].
44. Rumbaugh. J., et al. (2000). El Lenguaje Unificado de Modelado, Manual de Referencia, Addison-Wesley. Available: http://www.vico.org/aRecursosPrivats/UML_TRAD/TRADposter_QueEsUML.pdf. [citado mayo 2004].

45. Rodríguez, O. (2005). Manual de Usuario **Sistema Redox**. Derecho de Autor. Certificación de Depósito Legal Facultativo de Obras Protegidas. **CENDA**. Registro: 1589-2005.
46. Rosental, M.; Ludin, P. (1973). Diccionario filosófico. Ediciones Universo, Argentina.
47. Saunders, D. F., Branch, J. F, Thompson, C. K. (1994). Tests of Australian aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, 59, No. 3, 411-419.
48. Saunders, D. F., Burson, K. R., Branch, J. F. Thompson, C. K. (1993). Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics*, 58, No. 10, 1417 -1427.
49. Saunders, D. F., Burson, K. R., Thompson, C. K. (1999). Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *AAPG Bulletin*, 85 (1): 170-185.
50. Saunders, D. F., Burson, K. R. Branch, J. F., Thompson, C. K. (1989). Unconventional exploration methods work in East Texas , Alabama Ferry Field. *Oil and Gas Journal*.
51. Schulcloper, J. R. (1990). Modelos Matemáticos para el Reconocimiento de Patrones. Facultad de Matemática, Física y Computación. Universidad Central de Las Villas. (Folleto), pag. 245.
52. Schumacher, D. (1999). Surface geochemical exploration for petroleum; in *Exploring for traps and seals*. Chapter 18, 27pp. AAPG Memoir.
53. Smee, B. W. (2003). Theory behind the use of soil pH measurements as an inexpensive guide to buried mineralization, with examples. *Explore* No. 118.
54. Spiegel. M. R. (1971). Teoría y problemas de estadística. Editora Ciencia y Técnica. Instituto Cubano del Libro. La Habana.
55. Van der Werff, H., Lucieer, A. (2003). A contextual algorithm for detection of mineral alteration halos with hyperspectral remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*.
56. Variados documentos (1960-2000): Archivo Técnico EPEP Majagua, Ciego de Ávila.

57. Zajárov, E. V., Alvarez, J. (1974). Nota explicativa sobre la especificación de las reservas geológicas industriales y perspectivas del petróleo de los depósitos de la depresión Central (Jatibonico, Cristales, Catalina y Reforma). Informe Geológico. DGGG.
58. Zhao. J., Thomas. D. (2004). Comparación de herramientas de Modelado UML: Interprise Architect and Rational Rose. Available: <http://www.apexnet.com.ar/index.php/news/main/38/event=view> . [citado mayo 2004]